

Trabajo Fin de Grado

Aplicación de las tecnologías 4.0 para la mejora
de la eficiencia en el transporte por carretera

*Application of 4.0 technologies to improve
efficiency in road transport*

Autor/es

Martina Ruiz Simón

Director/es

Emilio Larrodé Pellicer
Fernando Pascual Andreu

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a Emilio Larrodé Pellicer y Fernando Pascual Andreu por darme la oportunidad de realizar este trabajo, la confianza depositada en mí y el apoyo que me han brindado.

Especialmente a todo el equipo de PRODEO por su paciencia, dedicación y por todo lo que me han enseñado y ayudado.

Agradecer a todos los compañeros y amigos que me han acompañado en esta etapa académica cuya finalización supone un punto y seguido en mi formación

Y por supuesto, a mi familia, sin los que esto no sería posible.

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado presenta una primera parte de la investigación acerca de la influencia de la resistencia aerodinámica en el transporte por carretera. En principio se iba a realizar el proyecto sobre un transporte de mercancías, pero debido a las limitaciones de este trabajo, se lleva a cabo en primer lugar sobre un vehículo turismo que circula por carretera. Para ello se presentan los principales parámetros que afectan al consumo de combustible en un vehículo cuando se encuentra en ruta, analizando las diferentes resistencias que se oponen al movimiento y la importancia que tendrán cada una de estas, haciendo hincapié en la resistencia aerodinámica.

Inicialmente, desde el punto de vista del marco teórico, se muestra el estado del arte del estudio de la influencia de la aerodinámica en vehículos en carretera y su evolución, mostrando los aspectos más relevantes de las investigaciones que se han llevado a cabo hasta el momento, y la importancia en el ámbito económico de estos, además de introducir las novedades que presenta este estudio en comparación con lo que ya se ha hecho.

Adicionalmente, se aplica el modelo teórico de fuerzas que afectan a un vehículo cuando este se encuentra circulando por carretera, explicando la influencia de las resistencias que aparecen tales como la resistencia de rodadura, resistencia aerodinámica, resistencia a las inercias y resistencia a las pendientes, explicando el modelo matemático con la formulación correspondiente. Además, se explica el cálculo de la energía y consumo de combustible.

Seguidamente se procede a describir el problema que se plantea, en primer lugar, se llevarán a cabo una serie de pruebas con un turismo, con el objetivo de mejorar y perfeccionar la recogida de datos. Posteriormente una vez establecida una ruta adecuada y definidas las aplicaciones móviles utilizadas en el registro de datos, se procede a realizar una serie trayectos con un modelo de vehículo Volkswagen Polo. En estos, se registrarán en tiempo real parámetros como la velocidad, la altitud de la ruta o la velocidad y ángulo de incidencia del viento.

Con los datos obtenidos, se lleva a cabo el cálculo de cada una de las resistencias al avance, estudiando la influencia que tienen en ellas cada uno de los diferentes factores. Posteriormente se analiza el consumo de energía. Todo esto se apoya en una serie de gráficos con los que se puede percibir de manera visual cada influencia y tendencia.

Finalmente se redactan una serie de conclusiones, que permiten introducir mejoras en la optimización del consumo de combustible en vehículos en carretera.

ABSTRACT

This Final Degree Project presents the first part of the research on the influence of wind on road transport. Initially, the project was going to be carried out on a goods transport, but due to the limitations of this work, it is carried out firstly on a vehicle travelling on the road. To this end, the main parameters that affect fuel consumption in a vehicle when it is on the road are presented, analysing the different resistances that oppose movement and the importance that each of these will have, with emphasis on aerodynamic resistance.

Initially, from the point of view of the theoretical framework, the state of the art of the study of the influence of aerodynamics in road vehicles and its evolution is shown, showing the most relevant aspects of the research that has been carried out so far, and the importance in the economic field of these, as well as introducing the novelties that this study presents in comparison with what has already been done.

In addition, the theoretical model of the forces that affect a vehicle when it is travelling on the road is proposed, explaining the influence of the resistances that appear such as rolling resistance, aerodynamic resistance, resistance to inertias and resistance to slopes, explaining the mathematical model with the corresponding formulation. In addition, the calculation of energy and fuel consumption is explained.

The problem is then described, firstly, a series of tests will be carried out with a passenger car, with the aim of improving and perfecting the data collection. Subsequently, once a suitable route has been established and the mobile applications used for data recording have been defined, numerous journeys will be made with a Volkswagen Polo vehicle model. During these journeys, parameters such as speed, altitude along the route and wind speed and angle of incidence are recorded in real time.

With the data obtained, the calculation of each of the driving resistances is carried out, studying the influence that each of the different factors have on them. Subsequently, the energy consumption is analysed. All of this is supported by a series of graphs with which each influence and trend can be visually perceived.

Finally, a series of conclusions are drawn up, which allow improvements to be made in optimising fuel consumption in vehicles on the road.

ÍNDICE

1. INTRODUCCION	12
1.1 Motivación y relevancia	12
1.2 Objetivos, justificación y alcance	13
2. METODOLOGÍA DE TRABAJO	15
3. ESTUDIOS PREVIOS	17
3.1 Estado del arte	17
3.1.1 Evolución en el uso de los combustibles fósiles y la búsqueda de su optimización	17
3.1.2 Aparición de las tecnologías 4.0 y aplicaciones en la circulación por carretera	18
3.1.3 Factores que afecta al consumo de combustible y evolución hacia su mejora	19
3.1.4 Estudios realizados sobre la aerodinámica y la optimización en el consumo de combustible en vehículos	19
4. ANÁLISIS MATEMÁTICO	22
4.1 Fundamentación teórica	22
4.1.1 Resistencia aerodinámica	22
4.1.2 Resistencia de rodadura	29
4.1.3 Resistencia a las inercias	30
4.1.4 Resistencia a las pendientes	31
4.1.5 Resistencia total de avance al vehículo	32
4.1.6 Cálculo de la energía asociada a las resistencias de avance del vehículo	32
5. PROTOCOLO DEL ENSAYO	34
5.1 Aplicaciones móviles de recogida de datos	34
5.2 Pruebas y depuración de resultados	35

5.2.1	Instrumentalización del vehículo.....	35
5.2.2	Registro de datos en ruta	37
5.3	Comprobación medidas de velocidad del viento	42
5.4	Realización de ensayos	43
6	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.	47
6.1	Análisis de las resistencias al avance del vehículo	48
6.2	Análisis de la resistencia aerodinámica en los viajes realizados.....	56
6.2.1	Análisis de la influencia de la velocidad del vehículo y del viento en la resistencia aerodinámica	56
6.2.2	Análisis de la influencia del ángulo de incidencia real del viento en la resistencia aerodinámica	60
6.3	Análisis de la energía necesaria para vencer las resistencias al avance	65
6.4	Análisis de la influencia del cambio de velocidad del coche en la resistencia aerodinámica y la energía consumida	69
6.5	Análisis del consumo de combustible debido a la resistencia aerodinámica frontal en cada viaje	71
7.	CONCLUSIONES.....	78
8.	BIBLIOGRAFÍA	80

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Organigrama del trabajo. Fuente: Propia.	16
Ilustración 2 Tipos de viento que afectan a un vehículo en movimiento. Fuente: Propia.	25
Ilustración 3 Parámetros medidos por el anemómetro colocado en el vehículo. Fuente: Propia.	25
Ilustración 4 Aplicación de recogida de datos Anemotracker. Fuente: Anemotracker.	26
Ilustración 5 Descomposición velocidad aparente del viento. Fuente: Propia. .	27
Ilustración 6 Descomposición velocidad aparente del viento. Fuente: Propia. .	27
Ilustración 7 Descomposición velocidad aparente del viento. Fuente: Propia. .	28
Ilustración 8 Descomposición velocidad real del viento. Fuente: Propia.	28
Ilustración 9 Anemotracker aplicación. Fuente: Anemotracker.	34
Ilustración 10 CarScanner aplicación. Fuente: CarScanner.	34
Ilustración 11 GPSTracker aplicación. Fuente: GPSTracker.	35
Ilustración 12 Instrumentalización del vehículo de pruebas. Fuente: Propia. ...	36
Ilustración 13 Indicador 0º anemómetro. Fuente: Propia.	36
Ilustración 14 Instalación del OBD II en el vehículo. Fuente: Propia.	37
Ilustración 15 Camino de Monzalbarba. Fuente: Google Maps.	39
Ilustración 16 Ruta camino de Monzalbarba Fuente: Google Earth.	40
Ilustración 17 Perfil de elevación de la ruta. Fuente: Google Earth.	41
Ilustración 18 Dos anemómetros en el techo del vehículo para comprobar medidas viento. Fuente: Propia.	42
Ilustración 19 Instrumentalización vehículo de ensayo. Fuente: Propia.	44
Ilustración 20 Instrumentalización vehículo de ensayo. Fuente: Propia.	45

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Variación de f_o y f_s en función de la presión de inflado de los neumáticos. Fuente: Font, M. (2019). Estudio de la relación del conjunto neumático-llanta de un automóvil, con el consumo energético y la seguridad vial.	30
Gráfica 2 Perfil ruta Parque deportivo Ebro-Monzalbarba. Fuente: Propia.	41
Gráfica 3 Velocidad del viento aparente a 1 metro (naranja) y en el techo del vehículo(azul). Fuente: Trabajo fin de grado Iñaki Ibero Samaniego.	43
Gráfica 4 Resistencia total vencida por el motor. Zaragoza-Monzalbarba (20/04/21). Fuente: Propia.....	48
Gráfica 5 Resistencia total a vencer por el motor frente a el valor de las resistencias al avance del vehículo. Zaragoza-Monzalbarba (20/04/21). Fuente: Propia.....	50
Gráfica 6 Resistencia a las pendientes. Zaragoza-Monzalbarba (20/04/21). Fuente: Propia.....	51
Gráfica 7 Resistencia a las pendientes (verde claro) frente a la pendiente (verde oscuro). Zaragoza-Monzalbarba (20/04/21). Fuente: Propia.....	52
Gráfica 8 Resistencia a las inercias (amarillo) frente a la resistencia total al avance (azul). Zaragoza-Monzalbarba (20/04/21). Fuente: Propia.	53
Gráfica 9 Resistencia a las inercias (amarillo) frente a la aceleración del coche (azul). Zaragoza-Monzalbarba (20/04/21). Fuente: Propia.....	53
Gráfica 10 Resistencia de rodadura. Zaragoza-Monzalbarba (20/04/21). Fuente: Propia.....	54
Gráfica 11 Resistencia de rodadura (rojo) frente a velocidad del coche (azul). Zaragoza-Monzalbarba (20/04/21). Fuente: Propia.....	55
Gráfica 12 Resistencia de rodadura de tres días distintos. Fuente: Propia.....	55
Gráfica 13 Valores de Resistencia aerodinámica. Zaragoza-Monzalbarba (naranja). Monzalbarba-Zaragoza (azul). (11/05/21) Fuente: Propia.	56
Gráfica 14 Valor de velocidad del viento. Zaragoza-Monzalbarba (verde claro). Monzalbarba-Zaragoza (verde oscuro). (11/05/21) Fuente: Propia.....	57
Gráfica 15 Resistencia aerodinámica (verde) contra la velocidad del viento (morado) y del coche (azul). Zaragoza-Monzalbarba. (11/05/21). Fuente: Propia	59

Gráfica 16 Resistencia aerodinámica (eje vertical) en función del ángulo de incidencia real del viento. Zaragoza-Monzalbarba (11/05/21) Fuente: Propia.	61
Gráfica 17 Resistencia aerodinámica (eje vertical) en función del ángulo de incidencia real del viento. Monzalbarba-Zaragoza. (11/05/21). Fuente: Propia.	62
Gráfica 18 Resistencia aerodinámica (eje vertical) en función del ángulo de incidencia real del viento. Viaje Monzalbarba-Zaragoza. (29/04/21) Fuente: Propia.	64
Gráfica 19 Resistencia aerodinámica (eje vertical) en función del ángulo de incidencia real del viento. Viaje Monzalbarba-Zaragoza. (06/05/21) Fuente: Propia.	64
Gráfica 20 Valor de energía consumida debida a cada una de las resistencias al avance. Día 20/04/21. Zaragoza-Monzalbarba (azul) Monzalbarba-Zaragoza (naranja). Fuente: Propia.	66
Gráfica 21 Valor de energía consumida debida a cada una de las resistencias al avance. Día 20/05/21. Fuente: Propia.	68
Gráfica 22 Valores de resistencia aerodinámica. Velocidad del vehículo media 70 km/h (naranja). Velocidad del vehículo media 41 km/h (azul). (20/05/21). Fuente: Propia.	69
Gráfica 23 Valores de energía consumida por cada resistencia. (20/05/2021). Fuente: Propia.	70
Gráfica 24 Valores de resistencia aerodinámica comprendidos entre los ángulos 340° y 20°. 20/04/21 (azul). 29/04/21 (verde). Fuente: Propia.	73
Gráfica 25 Consumo de gasolina instantáneo respecto a la velocidad resultante Día 20/04/21 (azul) Día 29/04/21 (verde). Fuente: Propia.	74
Gráfica 26 Consumo de gasolina instantáneo debido a la resistencia aerodinámica respecto a la velocidad resultante. Día 20/05/21 a 70 km/h (azul) Día 20/05/21 a 40 km/h (naranja). Fuente: Propia.	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ficha completa del modelo Volkswagen Polo 5P Advance 1.2 70 CV (2010-2011).....	24
Tabla 2 Valores característicos del coeficiente de rodadura para diferentes vehículos. Fuente: auto. howstuff.....	29
Tabla 3 Datos Anemotracker primera prueba. Fuente: Propia.	38
Tabla 4 Valores de consumo de combustible en cada viaje Zaragoza-Monzalbarba. Fuente: Propia	72
Tabla 5 Valores de consumo de combustible en cada viaje Monzalbarba-Zaragoza. Fuente: Propia.....	72
Tabla 6 Consumo de gasolina (L/100km) en función de la velocidad del viento a una velocidad del vehículo determinada y el ahorro en el consumo en %. Fuente: Propia.....	76

1. INTRODUCCION

1.1 Motivación y relevancia

El consumo de combustible en la circulación por carretera y en consecuencia los contaminantes que se emiten a la atmósfera y los gastos económicos que tienen que llevar a cabo los conductores y las empresas, constituye uno de los principales problemas a tratar sobre la circulación por carretera. La optimización del consumo de combustible es un punto en el que se ha avanzado mucho en los últimos años llevando a cabo estudios, simulaciones y experimentos de la influencia de los diferentes factores que afectan a un vehículo cuando circula por carretera.

Por ejemplo, las compañías logísticas que se ocupan del transporte de mercancías por carretera introducen constantes mejoras en las condiciones de sus flotas de camiones, haciendo hincapié en las condiciones aerodinámicas, como por ejemplo el diseño de la carrocería, ya que se ha demostrado que es el campo en el que mayor margen de mejora hay. Es por esto por lo que toda investigación que añada novedades en este ámbito será bien recibida y estudiada por ellas.

Sin embargo, así como las investigaciones en la mejora del diseño de la carrocería de los vehículos es algo en lo que se ha trabajado mucho, el estudio del viento y sus características, tales como la velocidad o la dirección que llevan y con la que inciden en el vehículo en un momento determinado, es un ámbito menos explorado.

Por lo que la motivación de este trabajo queda justificada entre otros factores por la relevancia y actualidad de la problemática en el consumo de combustible de transporte por carretera, habiendo resultado de estímulo también el constante esfuerzo por dirigirnos hacia un mundo más sostenible, tanto económica como ambientalmente.

1.2 Objetivos, justificación y alcance

La optimización del combustible en el transporte por carretera es un campo amplio y multidisciplinar, por lo que resulta importante establecer los objetivos y el alcance del trabajo en función de las aportaciones que se pueden introducir.

Cuando se habla de optimización, es común hacer referencia a términos de gestión y producción. A medida que se han ido realizando investigaciones en el transporte por carretera se han ido introduciendo constantes mejoras.

En este trabajo se van a llevar a cabo mediciones en carretera para poder llegar a un modelo analítico con el que se pueda optimizar en tiempo real el consumo de combustible.

Los objetivos quedan desglosados a continuación:

- Llevar a cabo un primer estudio a cerca de las investigaciones y pruebas que se han realizado con anterioridad en el campo de los consumos de combustibles en el transporte por carretera sobre vehículos de todo tipo, como pueden ser turismos, camiones, furgonetas...
- En segundo lugar, establecer un modelo teórico en el que se muestren las diferentes resistencias que se oponen al avance del vehículo en carretera, tales como resistencia de rodadura, resistencia a las pendientes, resistencia aerodinámica y resistencia de inercia. Introduciendo la formulación correspondiente y los cálculos energía posteriores.
- Seguidamente realizar una serie de mediciones en tiempo real, sobre un vehículo que realizará una ruta establecida entre el Parque deportivo Ebro y el barrio de Monzalbarba, ambos situados en la localidad de Zaragoza. Con anterioridad a estas, se habrán realizado pruebas en otro vehículo para familiarizarse con el registro de datos y saber cómo tratar con ellos, definiendo el procedimiento llevado a cabo.
- Finalmente, definir un modelo teórico aplicado de optimización de combustible en el transporte de vehículos por carretera basado en los resultados de las mediciones llevadas a cabo, siempre dentro de las

limitaciones que impone este problema planteado debido a la complejidad y los numerosos factores que intervienen.

Este trabajo podrá servir de apoyo a posteriores investigaciones que se llevarán a cabo en vehículos de transporte de mercancías.

El alcance del trabajo ha quedado dividido en cuatro partes diferenciadas que son:

1. Marco general introductorio sobre el problema que se va a abordar.
2. Marco teórico con el modelo matemático que define el problema.
3. Parte experimental, donde se registran datos reales y se trabaja con ellos.
4. Conclusiones a cerca de los resultados obtenidos en el punto anterior.

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

En la primera parte del trabajo, se introduce el concepto de aerodinámica y de las resistencias que aparecen en la conducción por carretera, así como el estado del arte sobre el tema que se va a tratar, es decir, los estudios que se han llevado a cabo a cerca de la eficiencia en el transporte por carretera, quién los ha realizado, los pros y contras de estos y lo que se va a aportar de novedoso con este trabajo.

Por otro lado, se procede a realizar un estudio previo teórico, donde se abordan las resistencias que aparecen cuando se circula por carretera y que se oponen a el avance del vehículo. En esta parte se introducen fórmulas matemáticas para el cálculo de cada una de ellas, así como la cantidad de energía que tiene que suministrar el motor para vencerlas, es decir, el combustible consumido.

Explicado el modelo teórico, se procede a definir el problema a resolver. Para ello se muestra el vehículo sobre el que se va a llevar a cabo la medición de parámetros, con la instrumentalización de este. También se explica la ruta que se va a establecer, atendiendo a las características que más convienen como, por ejemplo, que no haya obstáculos en los laterales, es decir que no haya edificios para que el viento incida de manera más clara. Además, se establece un principio y un final de la ruta, con la que se parametriza y finalmente se definen los aparatos de medida y aplicaciones de registro de datos que se van a utilizar, como son los anemómetros, soportes, OBD II...

Tras la realización de los trayectos y la obtención de los datos, se procede a tratar con ellos. Para ello se utiliza el modelo teórico explicado anteriormente. Con los resultados, se introducen gráficos para poder establecer relaciones entre distintos factores y el consumo del combustible en carretera.

Por último, se resumen los principales resultados que se han obtenido y que tendrán como objetivo principal llegar a una conclusión sobre la optimización del consumo de combustible en la circulación de vehículos por carretera en función de los distintos parámetros que se recogen.

Esta metodología de trabajo queda recogida en la siguiente ilustración donde se muestra el organigrama del trabajo.

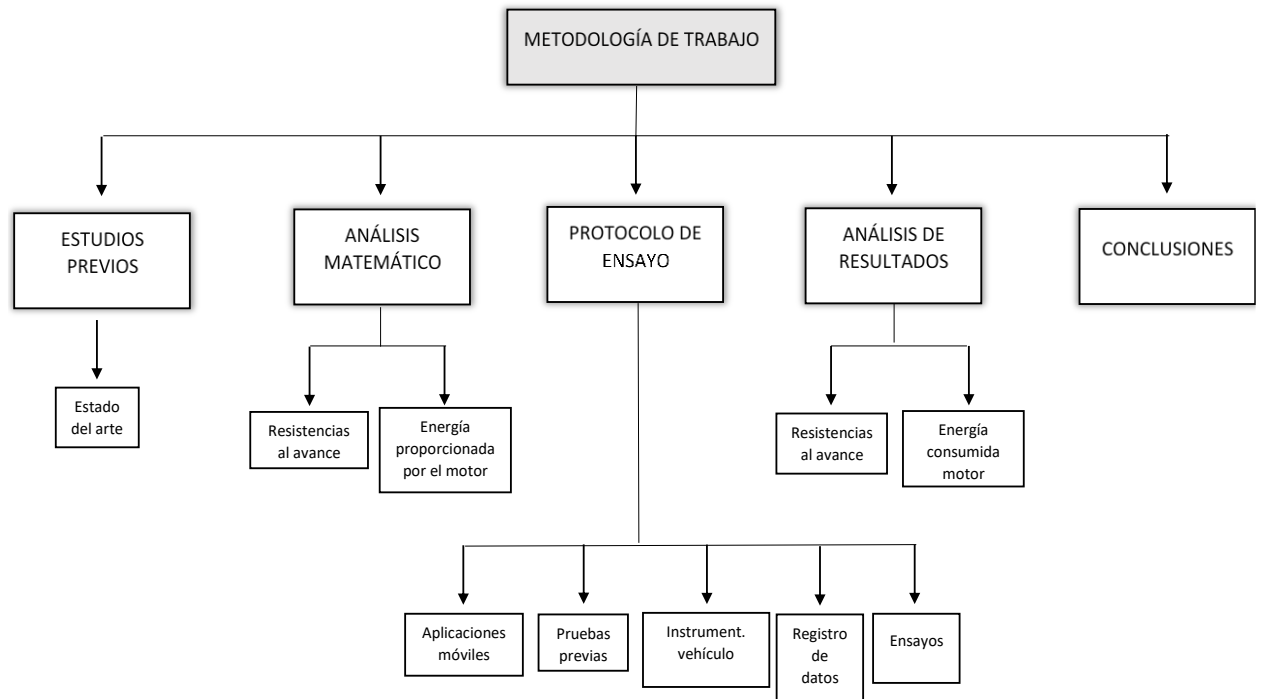


Ilustración 1 Organigrama del trabajo. Fuente: Propia.

3. ESTUDIOS PREVIOS

3.1 Estado del arte

El transporte de por carretera constituye uno de los principales sectores de la industrial mundial. Es por eso por lo que se han llevado a cabo grandes mejoras en este, tanto en el diseño de las carrocerías de los vehículos como en la construcción de carreteras y señalización.

3.1.1 Evolución en el uso de los combustibles fósiles y la búsqueda de su optimización

El uso de combustibles fósiles es la principal fuente de energía de los vehículos de motor. Con el tiempo, la población se ha ido dando cuenta de que las reservas de estos suministros son limitadas y que el impacto económico y ecológico de estos es muy importante. Por esto desde hace unas décadas, la sociedad se está moviendo hacia un mundo más sostenible, llevando a cabo acciones para la optimización y reducción del consumo de estos.

Sin embargo, el problema es más complicado de lo que parece, porque por ejemplo a medida que se va abaratando el precio de estos combustibles debido a los cambios económicos, la población y las empresas tienden a utilizarlos en mayor cantidad, lo que se conoce como el “efecto rebote”.

Es conocido que entre el 65-75% del total de combustible de países como EE. UU o Alemania es utilizado en el transporte de mercancías. En España, según el Observatorio de Costes del Transporte de Mercancías por Carretera publicado por el Ministerio de Fomento [1], un vehículo articulado de unos 25.000 kg de carga útil que recorre unos 120.000 km anuales tendrá un gasto de combustible de más de 40.700 €, lo que hoy en día supone aproximadamente el 30% del coste total del vehículo, lo que hace que las compañías logísticas estén llevando a cabo investigaciones para poder optimizar el consumo de combustible y reducir así los gastos.

En vehículos que circulan por carretera, aunque en menor medida que en camiones, los gastos que se producen por consumo de combustible son los mayores. El consumo de combustible de los motores de combustión interna (MCI) a partir de derivados del petróleo creció según los datos del INE (Instituto Nacional de Estadística) en 2015 [2] ya que el número de vehículos se incrementó entre 2010 y 2015 en un 57%. Estos datos reflejan un claro “boom” en el uso de vehículos en España, por lo que la venta de combustible aumentó de forma considerable, convirtiéndose en uno de los principales gastos de los ciudadanos y las empresas.

3.1.2 Aparición de las tecnologías 4.0 y aplicaciones en la circulación por carretera

A partir de la aparición de la informática y del lenguaje computacional, surgió lo que se denomina cuarta revolución industrial, que busca la digitación de todos los sectores industriales. Las tecnologías que han permitido esta evolución son variadas y complejas, aunque cabe mencionar las siguientes: big data y análisis de datos, robots autónomos, el Internet de las cosas (IOT), fabricación aditiva...

El sector del automóvil no ha escapado de esta revolución. Algo tan simple como la colocación de un GPS en el vehículo, ayudó a las compañías a reducir el tiempo de las rutas, geolocalizar a los clientes y de esta forma aumentar el número de envíos y en consecuencia las ganancias.

En lo que atiene al sector de transporte de mercancías por carretera, según el Centro Español de Logística [3], existe la necesidad de mejorar la actual capacidad de las redes de comunicación fijas y móviles para adaptarse a las nuevas corrientes y destaca la necesidad de aplicaciones nuevas con las que introducir nuevas mejoras.

En este trabajo se lleva a cabo la utilización de aplicaciones en tiempo real con las que se registran datos utilizando el Big Data y análisis, con los que se obtienen resultados para la mejora de las condiciones de la circulación y la optimización del consumo del combustible.

3.1.3 Factores que afecta al consumo de combustible y evolución hacia su mejora

A lo largo de estos últimos años se han producido nuevas corrientes que reducen el consumo de combustibles fósiles en el transporte por carretera, como la modificación de la forma del vehículo el uso de neumáticos radiales, el uso de fuentes de energía renovables (eléctricos), nuevos diseños de motores para optimizar la combustión...

Actualmente, se sigue una tendencia que se dirige hacia la construcción de vehículos más pequeños y de menor peso, por ejemplo, con el uso de nuevos materiales más ligeros.

Sin embargo, queda un largo camino por hacer, ya que no se pueden reducir los tamaños de los vehículos de forma tan sencilla sin quitar otras prestaciones que nos ofrecen como por ejemplo un maletero amplio o la capacidad de llevar a un número de pasajeros mayor.

3.1.4 Estudios realizados sobre la aerodinámica y la optimización en el consumo de combustible en vehículos

Desde un punto de vista teórico, existen diferentes resistencias que aparecen en oposición al movimiento de un vehículo, inercias, rodadura, aerodinámica y pendientes. Todas estas intervienen en el aumento del consumo del combustible, sin embargo, no lo hacen de forma paritaria, ya que en cada un afectan una serie de factores y de condiciones diferentes.

El impacto de la velocidad de los vehículos en el consumo de combustible es un campo en el que se han llevado a cabo muchas investigaciones en las que siempre se llega a la conclusión de que un aumento de la velocidad del vehículo impone un aumento de la potencia que tiene que desarrollar el motor y por lo tanto un crecimiento del consumo.

Las limitaciones de velocidad que impone el Ministerio de Fomento en carreteras, además de para disminuir la cantidad de siniestros, sirven para

reducir el consumo de combustible y en consecuencia la emisión de contaminantes a la atmósfera.

En lo que respecta a estos ámbitos, un estudio realizado en enero de 2009 por Joe Tramblay, Richard Ziernick, Ben Railsback y Mark Kittel integrantes del Knot Laboratory [4], llevó a cabo una investigación a cerca de los efectos que el viento en la época de invierno podía tener sobre la estabilidad de los vehículos. En este se llegó a la conclusión de que reduciendo a la mitad la velocidad de un camión en condiciones adversas en la época de invierno con velocidades de viento altas, se reducía a la mitad el riesgo de perder el control del tráiler.

Respecto al estudio de resistencias al avance del vehículo, se llevó a cabo un informe en 2014, realizado por Roberth Castillo [5], en el que realizando mediciones sobre un vehículo modelo Kia Rio R que circulaba por carretera y teniendo en cuenta las resistencias al avance obtuvo resultados a cerca del consumo de combustible, diferenciando cuando se circulaba por ciclo urbano (5,283 L/100km) y por ciclo extraurbano (3,509 L/100km) y con estos valores, realizar una base de datos que permitiría tener una referencia del consumo de combustible en los vehículos más representativos cuando circulan por ciudad. Sin embargo, en este estudio, no se realizaron mediciones de velocidad y dirección del viento en tiempo real, como sí se va a hacer en este trabajo, sino que se realizaron estimaciones de los coeficientes de arrastres y aerodinámico.

Es el campo de medida de velocidad del viento y dirección es donde se encuentra un ámbito en el que no se ha explorado con profundidad, y en el que se va a centrar este trabajo, llevando a cabo medidas en tiempo real de estos parámetros cuando un vehículo realiza un trayecto.

En el caso de la circulación de camiones por carretera, también se han realizado muchas investigaciones en la reducción del combustible. En el año 2019, un trabajo de fin de grado realizado en la escuela Técnica Superior de Manresa por Albert Yela Paradas y tutelado por Jordi Vives [6], consiguió mejorar el diseño inicial de un camión a través de introducir novedades con la ayuda de Solid Works, una herramienta de simulación en 3D. Según las simulaciones que se llevaron a cabo en este, se ve reflejado como el consumo de combustible se reduce hasta en 3,22 L cada 100 km.

El año pasado, se realizó en septiembre un estudio en el que de la misma forma que en el anterior se utilizaron softwares de simulación como ANSYS Fluent con el objetivo de reducir el consumo de combustible en cuatro modelos distintos de camiones. Para ello se adaptaron modificaciones de perfil en el modelo de camión-remolque agregando un difusor inferior en la parte trasera del camión, un generador de vórtice en la parte superior y una cola de rebote en la parte trasera del camión. Se observó que la adicción de la cola en la parte trasera reducía la resistencia aerodinámica en un 34,28% en comparación con el modelo inicial, lo que reducía el consumo de combustible en un 20,57% a una velocidad constante de 82 km/h. Este estudio, se apoyó en otra investigación llevada a cabo, que se centró en los dispositivos de reducción de resistencia aerodinámica del tren de aterrizaje que mejoran el ahorro de combustible de los vehículos con remolque. Utilizando para las pruebas vehículos combinados, con remolque, y limitando la velocidad del viento en 10 millas por hora, se obtuvieron conclusiones como que el uso de distintos diseños de llantas llevaba a ahorros de combustible de 4,5-4,3% debido a la reducción de la resistencia aerodinámica.

Una vez analizado el estado del arte del problema que se va a abordar, se procede a analizar la teoría que se va a aplicar en este trabajo de fin de grado, así como la ruta que se va a realizar para la obtención de los datos reales.

4. ANÁLISIS MATEMÁTICO

En este capítulo se va a exponer el modelo teórico matemático a aplicar, con la explicación de las resistencias que aparecen al avance del vehículo y la suma de todas estas, además de ir introduciendo alguno de los valores que se utilizará en el cálculo posterior tras los ensayos realizados en el turismo correspondiente.

4.1 Fundamentación teórica

A continuación, se muestra la teoría de las fuerzas que se oponen al movimiento de un automóvil cuando se encuentra en carretera.

Todo vehículo que circula por cualquier tipo de carretera tiene que vencer 4 tipos de resistencia que se oponen a su avance, a parte de la influencia de otros factores como el deterioro de la calzada, piedras, baches... Estas cuatro resistencias que aparecen son las que se definen y formulan a continuación.

4.1.1 Resistencia aerodinámica

La resistencia aerodinámica, es la fuerza que aparece en oposición al movimiento de un vehículo que se mueve a través del viento.

El turismo de estudio tiene que apartar una cantidad de viento para poder avanzar. La presión del viento contra el frontal y el vacío generado en la parte trasera se combinan para generar una fuerza opuesta al movimiento. A velocidades del vehículo y del viento bajas, esta resistencia toma valores pequeños, como se verá en el apartado de resultados, sin embargo, aumentará conforme las dos velocidades aumenten.

La fórmula que se utiliza para el cálculo de la resistencia aerodinámica en este trabajo es la siguiente:

$$Ra (kg) = \frac{1}{16} * Cd * f * Superficie * \left(vel_{apararente_y} \right)^2 \text{ (ec. 1)}$$

Donde:

- Cd: coeficiente de penetración aerodinámico.
- f: coeficiente estimado para calcular la superficie frontal = 0,85.
- Superficie: superficie sobre la que incide el viento. Puede ser lateral o frontal.

- Para el caso de superficie lateral se calcula de la forma:

$$Super_{lat}(m) = h * Long \text{ (ec. 2)}$$

- Para el caso de superficie frontal, (el caso que atiene a este trabajo):

$$Super_{frontal}(m) = h * w \text{ (ec. 3)}$$

Siendo:

- w: anchura del vehículo.
- h: altura del vehículo.
- Long: longitud del vehículo.
- $vel_{apararente_y}$: velocidad aparente del viento en cada instante (m/s).


Los valores de los parámetros w, h y longitud son fijos para el vehículo en el que vamos a realizar las pruebas y que se pueden observar en la tabla 1.

- w= 1,682 m
- h= 1,462 m
- Longitud= 3,970 m

Por otro lado, el valor del coeficiente aerodinámico se fija en 0,32 según la ficha técnica del vehículo de la página de Volkswagen Polo.

Tabla 1 Ficha completa del modelo Volkswagen Polo 5P Advance 1.2 70 CV (2010-2011).

Fuente: Km 77.

Prestaciones y consumos homologados	
Velocidad máxima	165 km/h
Aceleración 0-100 km/h	14,1 s
Consumo NEDC	
Extraurbano	4,5 l/100 km
Urbano	7,3 l/100 km
Medio	5,5 l/100 km
Emisiones de CO ₂ NEDC	128 gr/km
Normativa de emisiones	No disponible
Distintivo ambiental DGT	 C
Dimensiones, peso, capacidades	
Tipo de Carrocería	Turismo
Número de puertas	5
Longitud	3.970 mm
Anchura	1.682 mm
Altura	1.462 mm
Batalla	2.470 mm
Vía delantera	1.463 mm
Vía trasera	1.456 mm
Peso	1.142 kg
Tipo de depósito	
Gasolina	45 l
Filtro de partículas	No
Volúmenes de maletero	
Volumen con una fila de asientos disponible	952 litros
Volumen mínimo con dos filas de asientos disponibles	280 litros
Número de plazas	5
Distribución de asientos	2 + 3

La velocidad del coche la vamos a obtener a través de las aplicaciones de registro de datos que van a ir conectadas en tiempo real al mismo.

El único dato que queda por definir es la velocidad aparente la cual es más compleja de obtener de lo que parece, ya que existen un total de tres componentes principales de viento, como se puede observar en la ilustración 2, con sus ángulos de incidencia correspondientes:

- Viento relativo: se trata del viento que se genera debido a la velocidad del objeto en movimiento, por lo que tiene igual magnitud que la velocidad del vehículo y sentido contrario.
- Viento real: es el viento que es percibido por el observador que se encuentra en reposo.
- Viento aparente: se trata del viento que nota un observador que está en un objeto en movimiento. Este viento resulta de la suma vectorial del viento real más el viento relativo.

V=Velocidad del vehículo

H=Viento generado

W= Viento Real

A= Viento aparente

β = Ángulo del viento aparente

α = Ángulo de ataque

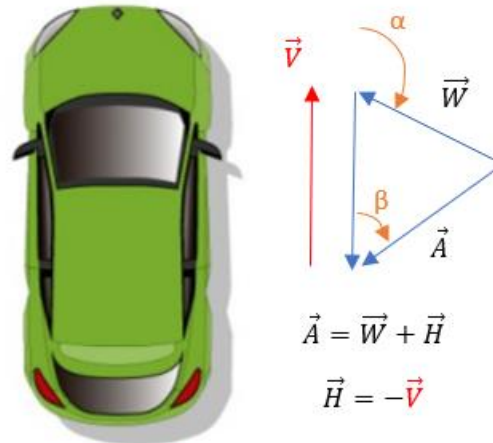


Ilustración 2 Tipos de viento que afectan a un vehículo en movimiento. Fuente: Propia.

En lo que respecta a este trabajo, el anemómetro que se utiliza para medir la velocidad del viento mide la velocidad aparente (AWS, *Apparent Wind Speed*) en m/s, km/h o nudos. Además gracias al GPS del propio móvil, muestra la velocidad del viento relativo, que coincide con el valor de velocidad que lleva el vehículo (Speed), con dirección contraria. Con estos dos datos y los ángulos de incidencia del viento aparente (AWA, *Aparent Wind Angle*) y real (TWA *True Wind Angle*), la aplicación realiza la cuenta necesaria para además mostrar en pantalla el dato de velocidad del viento real (TWS *True Wind Speed*). Todos estos valores quedan ilustrados en la ilustración 3.

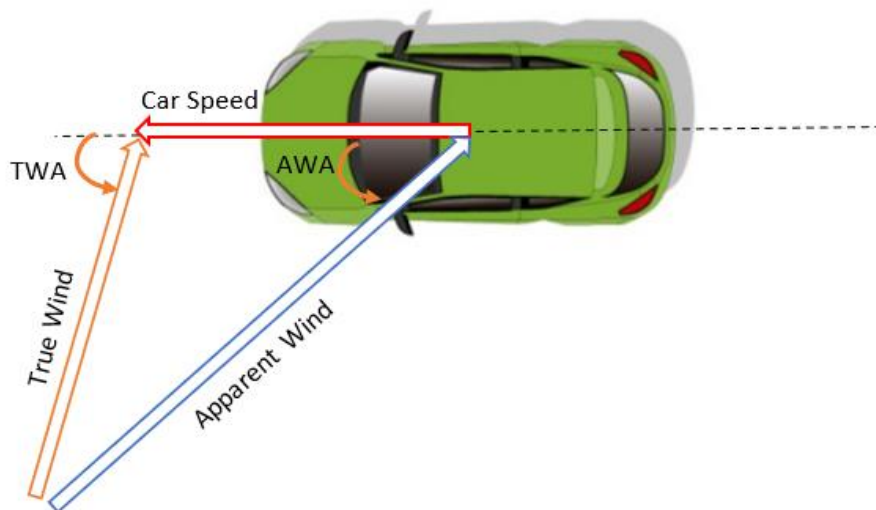


Ilustración 3 Parámetros medidos por el anemómetro colocado en el vehículo. Fuente: Propia.



Ilustración 4 Aplicación de recogida de datos Anemotracker. Fuente: Anemotracker.

Una vez la aplicación registra en cada instante el valor de velocidad del viento aparente, hay que considerar otro factor, la dirección con la que incide sobre el vehículo. Como el ángulo de incidencia del viento aparente es conocido, se descompone el valor de resistencia aerodinámica en dos componentes, la vertical que se opondrá al movimiento del vehículo, y por lo tanto será la que se utilice en el cálculo de resistencia aerodinámica que se opone al movimiento de avance del vehículo, y la horizontal, que afectará a la estabilidad de este.

Para ello se proyecta el vector de velocidad aparente del viento en los dos ejes, tanto “y” (vertical) como “x” (horizontal) multiplicando por el coseno del ángulo o por el seno según corresponda. Existen cuatro opciones según sea el valor del ángulo de incidencia del viento aparente (AWA), como se detalla a continuación.

- El ángulo de incidencia se encuentra entre 0° y 90°:

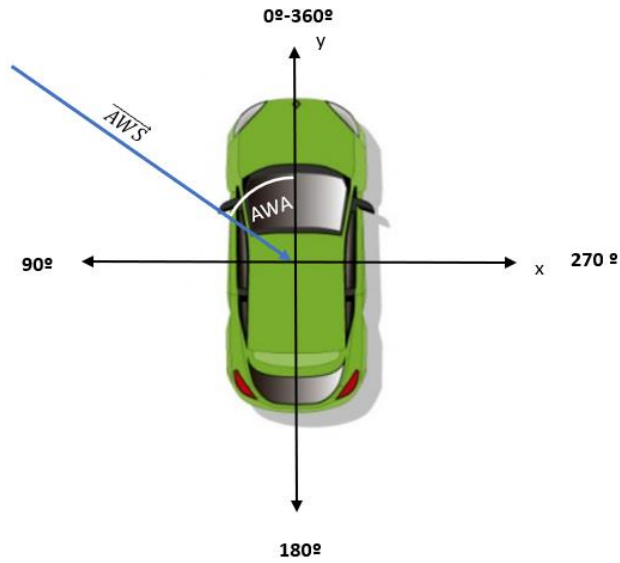


Ilustración 5 Descomposición velocidad aparente del viento. Fuente: Propia.

$$v_{viento_{aparente_y}} = vel_{viento_{aparente}} * \cos(AWA) \text{ (ec. 4)}$$

$$v_{viento_{aparente_x}} = vel_{viento_{aparente}} * \sen(AWA) \text{ (ec. 5)}$$

- El ángulo de incidencia se encuentra entre 90° y 180°:

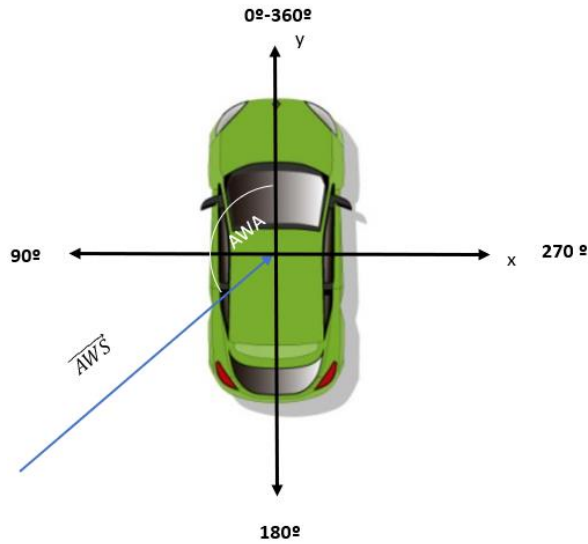


Ilustración 6 Descomposición velocidad aparente del viento. Fuente: Propia.

$$v_{viento_{aparente_y}} = vel_{viento_{aparente}} * \sen(AWA - 90^\circ) \text{ (ec. 6)}$$

$$v_{viento_{aparente_x}} = vel_{viento_{aparente}} * \cos(AWA - 90^\circ) \text{ (ec. 7)}$$

- El ángulo de incidencia se encuentra entre 180° y 270°:

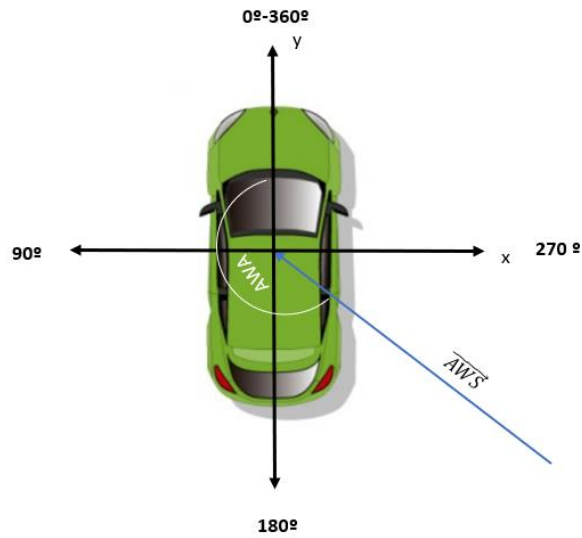


Ilustración 7 Descomposición velocidad aparente del viento. Fuente: Propia.

$$v_{viento_{aparente_y}} = vel_{viento_{aparente}} * \cos(AWA - 180^\circ) \text{ (ec. 8)}$$

$$v_{viento_{aparente_x}} = vel_{viento_{aparente}} * \sin(AWA - 180^\circ) \text{ (ec. 9)}$$

- El ángulo de incidencia se encuentra entre 270° y 360°:

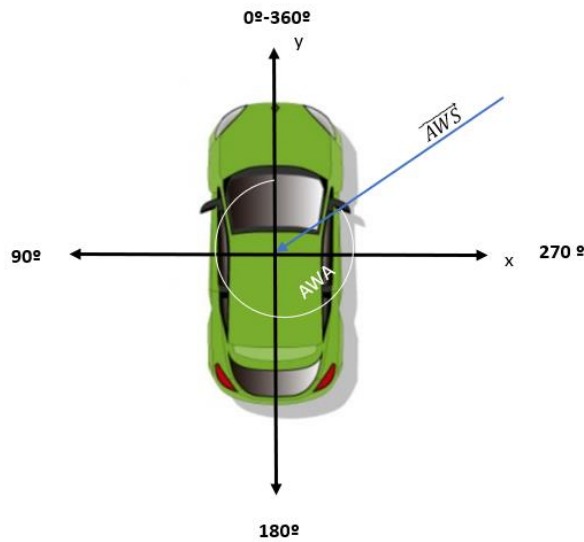


Ilustración 8 Descomposición velocidad real del viento. Fuente: Propia.

$$v_{viento_{aparente_y}} = vel_{viento_{aparente}} * \sin(AWA - 270^\circ) \text{ (ec. 10)}$$

$$v_{viento_{aparente_x}} = vel_{viento_{aparente}} * \cos(AWA - 270^\circ) \text{ (ec. 11)}$$

4.1.2 Resistencia de rodadura

La resistencia a la rodadura va a aparecer cuando un cuerpo que rueda, o la superficie sobre la que lo hace, o ambos a la vez se deforman, acaso de las grandes presiones existentes en los puntos de contacto del proceso. El vehículo tiene que vencer continuamente un pequeño obstáculo que se le presenta por delante y que se opone a su avance. En el caso de los automóviles que circulan por carretera, la resistencia a la rodadura es producida por la deformación que se produce del neumático.

La fórmula que vamos a utilizar para su cálculo es:

$$Rr (kg) = coef_{rozamiento} * Peso_{total} \quad (ec. 12)$$

Donde:

- $coef_{rozamiento}$: coeficiente de rozamiento del asfalto con las ruedas.
- $Peso_{total}$: peso del coche más los integrantes. Se toma de media (70 kg por integrante).

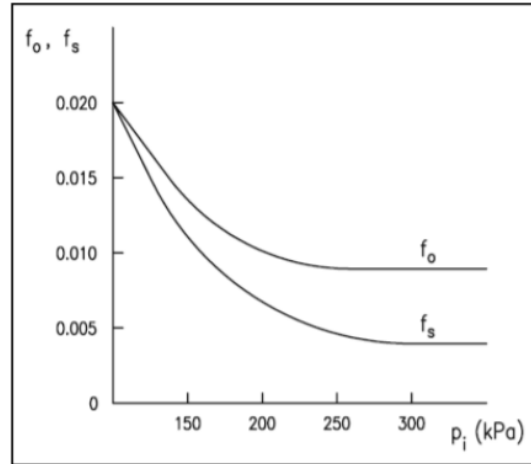
Tabla 2 Valores característicos del coeficiente de rodadura para diferentes vehículos. Fuente: auto. howstuff.

Rolling Resistance Coefficient		
c	c_l (mm)	
0.001 - 0.002	0.5	railroad steel wheels on steel rails
0.001		bicycle tire on wooden track
0.002 - 0.005		low resistance tubeless tires
0.002		bicycle tire on concrete
0.004		bicycle tire on asphalt road
0.005		dirty tram rails
0.006 - 0.01		truck tire on asphalt
0.008		bicycle tire on rough paved road
0.01 - 0.015		ordinary car tires on concrete, new asphalt, cobbles small new
0.02		car tires on tar or asphalt
0.02		car tires on gravel - rolled new
0.03		car tires on cobbles - large worn
0.04 - 0.08		car tire on solid sand, gravel loose worn, soil medium hard
0.2 - 0.4		car tire on loose sand

El coeficiente de rodadura cambia conforme aumenta la velocidad del turismo, como se puede observar en la gráfica 2 de acuerdo con el “estudio de la relación del conjunto neumático llanta de un automóvil, con el consumo energético y la seguridad vial” de la Escola Superior d’Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa [8]. Además, es conocido que este depende de otros factores como el peso soportado por la rueda, la forma del neumático, la presión de este o la velocidad de circulación. La presión de los

neumáticos del vehículo estándar es de 2,5 bar, lo que equivale a 250 kPa. Por ello se calcula el coeficiente de rodadura utilizando la siguiente fórmula:

$$\mu = (0,010 + 0,005((v [km/h]) / 100)^{2,5}) \text{ (ec. 13)}$$



Gráfica 1 Variación de f_o y f_s en función de la presión de inflado de los neumáticos. Fuente: Font, M. (2019). Estudio de la relación del conjunto neumático-llanta de un automóvil, con el consumo energético y la seguridad vial.

4.1.3 Resistencia a las inercias

Es la resistencia que aparece debido a la inercia del vehículo. Cuando este se encuentra en reposo o circulando a una velocidad constante y se desea acelerar, es necesario que la fuerza generada por el motor venza la resistencia de la inercia.

Este valor lo calculamos mediante la fórmula:

$$Ri(kg) = Aceleracion * \frac{Peso_{total}}{9,8} \text{ (ec. 14)}$$

Donde:

- *Aceleracion* : aceleración vehículo en m/s^2 .
- *Peso_{total}*: peso del coche más integrantes en kg.

Esta se tendrá en cuenta únicamente cuando la aceleración es positiva, es decir, cuando se aumenta la velocidad, ya que cuando toma valor negativo, no afecta a la resistencia total de avance. Con esto se quiere decir que, aunque

en los cálculos salgan valores negativos de resistencia de inercia, porque se está decelerando o parado, no supone un decremento de la resistencia y del consumo de combustible.

Así que, en este trabajo, en aquellos instantes en los que sea negativa, se toma el valor de 0 kg. Esta fuerza será alta cuando el vehículo realice paradas continuamente, por ejemplo, en la conducción por carretera o en lo que atiene a la circulación por autopistas o autovías, cuando se realizan paradas en peajes y se tiene que acelerar hasta alcanzar velocidades mayores.

4.1.4 Resistencia a las pendientes

La resistencia a las pendientes aparece cuando se produce un desnivel en la ruta, que puede ser un desnivel positivo, si la pendiente aumenta, o negativo cuando desciende. Así esta resistencia se opondrá al movimiento del vehículo cuando circule cuesta arriba y servirá de apoyo cuando circule cuesta abajo.

Para hallar el valor de la resistencia a las pendientes se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$Rp(kg) = Peso_{total} * \frac{m}{100} \text{ (ec. 15)}$$

En la que:

- $Peso_{total}$: peso total del coche más el de su carga más el de los integrantes.
- $\frac{m}{100}$: pendiente. Para calcularla se necesitan los datos de altitud (y) y de distancia recorrida en cada tramo (x).

$$\frac{m}{100} = \frac{y(n+1)-y_n}{x(n+1)-x} \text{ (ec. 16)}$$

Estos datos son obtenidos en el trabajo gracias al registro de la ruta que se realiza mediante una aplicación GPS Tracker, con la que se obtienen las coordenadas de latitud y de longitud en cada instante y el valor de altura en metros. Como los valores de latitud y longitud no son fáciles de tratar, para calcular la distancia recorrida entre dos puntos, se utiliza una fórmula

denominada fórmula del semiverseno, que es una ecuación para la navegación astronómica, que permite saber la distancia entre dos puntos conociendo la latitud y longitud de estos. Esta es un caso especial de trigonometría esférica, que relaciona los lados y ángulos de los “triángulos esféricos”.

4.1.5 Resistencia total de avance al vehículo

Una vez calculada cada una de las resistencias en kg, se procede a realizar la suma de todas para hallar la total de forma que:

$$R_t (kg) = R_a + R_r + R_i + R_p \text{ (ec. 17)}$$

Cuando la suma de estas da un valor negativo, significa que la resistencia a las pendientes toma un valor negativo alto, de forma que supera a la suma de las otras tres resistencias. Cuando esto sucede, se toma un valor de resistencia total de 0 kg, ya que no tiene sentido que el valor de resistencia total a vencer por el motor sea negativo, lo que implicaría un decremento en el consumo de combustible, algo que es físicamente imposible, esto quedará claramente representado en las gráficas de los ensayos.

4.1.6 Cálculo de la energía asociada a las resistencias de avance del vehículo

El ahorro de combustible como se ha desarrollado anteriormente es uno de los principales objetivos en la actualidad, ya que una suma importante del presupuesto de los usuarios se destina a este gasto.

Tras haber obtenido los datos en ruta y realizar el cálculo de las resistencias al avance en cada instante, se procede a calcular la energía necesaria para que el vehículo avance.

Para ello, se calcula el valor de energía necesaria en kWh que el motor necesita suministrar para conseguir vencer las resistencias. Así pues, la energía total que el motor deberá entregar en cada instante viene dada por:

$$Energía (Wh) = Rt * Distancia_{recorrida} \quad (ec. 18)$$

Hay que tener en cuenta que el valor de resistencia total se ha hallado como se ha explicado anteriormente en unidades de kg, en primer lugar, para transformarlo a Newtons, hay que multiplicarlo por 9,8:

$$1 \text{ kg fuerza} = 9,8 \text{ Newtons}$$

Y en segundo lugar para convertir este valor de energía que se obtiene de Julios a Watios por hora se divide por 3,6, ya que:

$$1Wh = 3,6 J$$

Por otro lado, se debe tener en cuenta las pérdidas que se producen a lo largo del sistema de transmisión del vehículo. Por un lado se considera un rendimiento del motor del 70% y por otro un rendimiento en la transmisión del 85%. Estos influyen en las pérdidas, por lo tanto la energía real se obtiene de la forma:

$$Energía_{real}(Wh) = \frac{Energía(Wh)}{\eta_{transmisión} * \eta_{motor}} \quad (ec. 19)$$

Se expresará el valor de energía en kWh, por lo que por último, a este valor hay que dividirlo por 1000 de la forma:

$$Energía_{real}(kWh) = \frac{Energía(Wh)}{1000} \quad (ec. 20)$$

Con esta fórmula, se calcula la energía requerida para vencer cada una de las cuatro resistencias. Una vez obtenidas, se analiza el porcentaje de la energía total que corresponde a cada una de las cuatro.

Hay que tener en cuenta que la resistencia a las pendientes toma valores negativos en aquellos casos en los que el vehículo circula cuesta abajo, en consecuencia la energía referida a las pendientes toma también valores negativos. Como los valores negativos de energía no tienen sentido, ya que significan que reduce el consumo de combustible, se considerará que la energía debida a las pendientes será 0 kWh cuando esto ocurra.

5. PROTOCOLO DEL ENSAYO

Explicado el modelo matemático teórico que se va a utilizar, se comienza a describir el protocolo de los ensayos realizados.

5.1 Aplicaciones móviles de recogida de datos

En primer lugar, se introducen las aplicaciones móviles que se utilizan en la recogida de datos tanto en las pruebas como en los ensayos del trabajo.

- Anemotracker: la aplicación que conecta mediante Bluetooth con el anemómetro que se coloca en el coche. Esta recoge los datos relacionados con el viento, tanto velocidades como ángulos y los muestra ordenados en el formato que se prefiera. En el caso de este trabajo, se utiliza el formato Excel.



Ilustración 9 Anemotracker aplicación. Fuente: Anemotracker.

- CarScanner: la aplicación que conecta con el dispositivo OBD II mediante conexión wifi. Esta recoge los datos pertenecientes al CanBus del coche, tales como potencia instantánea, velocidad del vehículo, consumo instantáneo...



Ilustración 10 CarScanner aplicación. Fuente: CarScanner.

- GPSTracker: esta aplicación recoge la ruta realizada en el ensayo para poder conocer la altitud en cada punto, además de la latitud y longitud.



Ilustración 11 GPSTracker aplicación. Fuente: GPSTracker.

5.2 Pruebas y depuración de resultados

Debido a lo novedoso de este proyecto, ya que no se había intentado con anterioridad medir con este tipo de anemómetro viento en tiempo real en automóviles, antes de realizar las mediciones oficiales, se realizaron una serie de pruebas en otro vehículo, para mejorar los procesos de recogida de datos y establecer el lugar óptimo de colocación del anemómetro en el techo del turismo.

5.2.1 Instrumentalización del vehículo

En primer lugar, tras estudiar la mejor forma de colocar el anemómetro, este se adosó a un imán, y se procedió a colocarlo en el techo del modelo de prueba de la forma que se muestra en la ilustración 12.



Ilustración 12 Instrumentalización del vehículo de pruebas. Fuente: Propia.

Además, para asegurar que el dispositivo no se soltara y produjera daños en otros coches, se colocó una cuerda de seguridad con el objetivo de agarrarlo.

También se tuvo en cuenta que la orientación del anemómetro fuera la correcta, es decir que el 0° estuviera en la parte delantera del vehículo, para que el ángulo real de incidencia del viento medido fuera correcto. Esto es fácil de realizar gracias a la marca que tiene el anemómetro en la parte delantera, que se puede observar en la ilustración 13.



Ilustración 13 Indicador 0° anemómetro. Fuente: Propia.

Una vez instalado el anemómetro se pasó a colocar el OBD II, más conocido como sistema de diagnóstico del motor, de la forma que se muestra en la ilustración 14, con este aparato no existen problemas, ya que solo hay una forma correcta de colocarlo en el coche. Hay un puerto debajo del volante en el que se introduce y conecta directamente con el CAN bus.



Ilustración 14 Instalación del OBD II en el vehículo. Fuente: Propia.

Una vez dispuestos los elementos, se procedió a circular con las aplicaciones de registro de datos conectadas, para observar cómo se comportaba el registro de datos en tiempo real.

5.2.2 Registro de datos en ruta

En el primer recorrido realizado, el registro de datos del OBD II se produjo de forma correcta, sin embargo, la recogida de datos del anemómetro se realizó cada minuto, como se puede ver en la tabla 4. Se cayó en la cuenta de que esta frecuencia de datos no iba a ser suficiente para conocer la incidencia real del viento en el consumo de energía del vehículo, ya que cuantos más datos se tienen, mejor se puede calcular. Por lo que se detectó el fallo y se cambió el registro de datos para que la aplicación lo hiciera cada 5 segundos en las pruebas oficiales.

Tabla 3 Datos Anemotracker primera prueba. Fuente: Propia.

Id	Lat	Lon	Date	AppWindAngle	AppWindModulus	TrueWindAngle	TrueWindModulus	Bearing	Speed	Temp
03/29/2021 12:50:08	13	12.5	03/07/2021 17:22	159	8,1	271	115	19.9	30	29
03/29/2021 12:51:09	358	13.4	03/07/2021 17:22	193	2,1	225	35	15.4	30	27
03/29/2021 12:52:09	160	16.1	03/07/2021 17:22	173	49,7	96	283,8	34.2	30	26
03/29/2021 12:53:09	9	10.7	03/07/2021 17:22	172	13	124	313,4	23.8	30	24
03/29/2021 12:54:09	168	11.6	03/07/2021 17:22	176	35,3	105	282,4	23.9	30	23
03/29/2021 12:55:09	171	10.8	03/07/2021 17:22	177	34,6	100	282,1	23.9	30	23
03/29/2021 12:56:10	165	10.9	03/07/2021 17:22	175	34,5	92	278,5	23.9	30	22
03/29/2021 12:57:10	167	22.3	03/07/2021 17:22	173	46	358	183,8	24	30	22
03/29/2021 12:58:10	6	10.6	03/07/2021 17:22	172	9,1	359	187	19.5	30	21
03/29/2021 12:59:10	341	10.1	03/07/2021 17:22	341	1	163	186,5	0	30	21
03/29/2021 13:00:10	358	10.2	03/07/2021 17:22	350	2,1	177	186,3	3.1	30	21
03/29/2021 13:01:11	6	11.1	03/07/2021 17:22	18	2,1	200	186,2	7.6	30	22
03/29/2021 13:02:11	9	12.3	03/07/2021 17:23	46	2,1	187	126,5	10.3	30	22
03/29/2021 13:03:12	21	8.4	03/07/2021 17:23	92	3	147	68,9	7.9	30	21

Por otro lado, también se puede observar cómo los datos de velocidad real del viento (True Wind Modulus) no tienen sentido, fueron muy grandes, debido a que el coche superaba en todo momento los 90 km/h (25m/s), valor límite de medida de este tipo de anemómetros. Así pues, apareció otro error a subsanar para el ensayo final, la velocidad no podía superar este valor ya que, si esto sucede, los datos obtenidos del anemómetro son erróneos.

Una vez realizados las pruebas y subsanados los errores encontrados, para comenzar a realizar los ensayos en el turismo, antes hay que establecer la ruta que se va a realizar, parametrizarla y realizar alguna simplificación si fuera necesario.

Se ha elegido el camino de Monzalbarba, en la localidad de Zaragoza, que tiene una media de 8 kilómetros y comunica el barrio de Monzalbarba con el barrio de La Almozara [7]. Tomamos esta ruta por diversas causas que se recogen a continuación.

- En primer lugar, no tiene tráfico, lo que nos favorece a la hora de realizar el ensayo, ya que vamos a circular a una velocidad baja para no superar los límites de medida del anemómetro (25 m/s) y también nos permitirá mantener una velocidad constante sin los impedimentos que pueden aparecer en las ciudades como los semáforos, pasos de peatones...
- Y, por otro lado, es un camino en el que no se encuentran edificios en los laterales ni impedimentos que favorezcan que el viento incida de forma más irregular en el vehículo (como se puede ver en la ilustración 15), por lo que de esta forma nos aseguramos de que las medidas de viento recogidas serán más reales a las que se puede encontrar en una carretera

tipo autovía o autopista que un turismo o cualquier tipo de automóvil lleve a cabo.



Ilustración 15 Camino de Monzalbarba. Fuente: Google Maps.

5.2.2.1 Límites de análisis de la ruta

La ruta consta de dos tramos diferenciados. El primero tiene una longitud de 3 km y comunica el barrio de La Almozara, con el Parque Deportivo Ebro. En este parque es donde se establece el principio de la ruta. Las coordenadas son $41^{\circ} 40' 04,12''$ N y $0^{\circ} 55' 20,54''$ O y el punto de salida tiene una altura de 196 metros.

A partir de este punto, se comienzan a registrar los datos del anemómetro y del vehículo, con las aplicaciones correspondientes para realizar los cálculos posteriores.

El segundo tramo consta de 6 kilómetros, que comunica el Parque Deportivo Ebro con el barrio de Monzalbarba, es un tramo frecuentado por vehículos conducidos por personas que tienen alguna parcela próxima o por ciclistas, ya que los vecinos próximos utilizan la autovía paralela, por lo que no existe mucho tráfico.

El punto final de la ruta se establece por lo tanto en el barrio de Monzalbarba, con coordenadas $41^{\circ} 42' 07.34''$ N y $0^{\circ} 57' 56.32''$ O y una altura de 204 metros.

El camino que realizar queda establecido como se puede visualizar en la ilustración 16 con color azul.

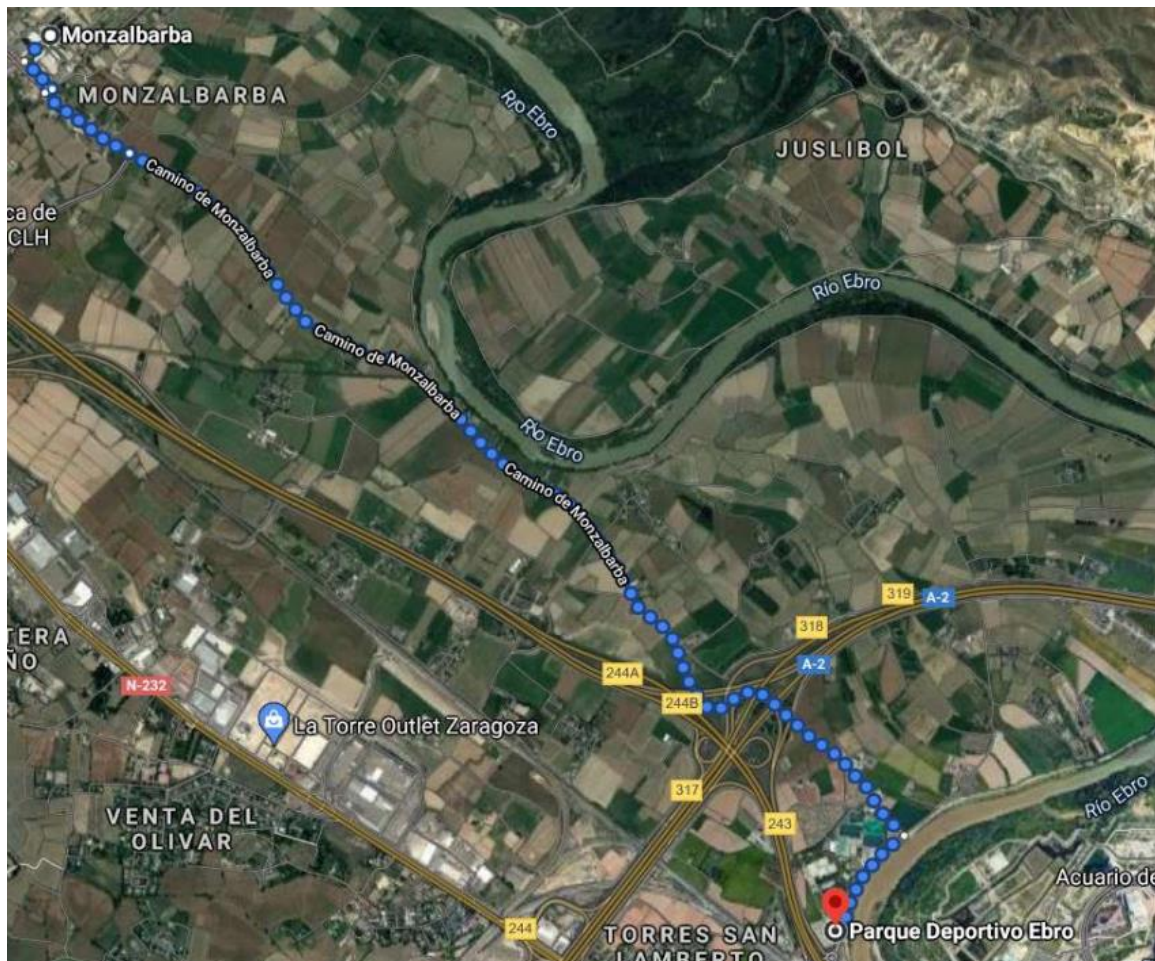


Ilustración 16 Ruta camino de Monzalbarba Fuente: Google Earth.

A través de la herramienta de Google Earth se ve el perfil de elevación de la ruta, así como la distancia total recorrida. Aunque los datos de altura en cada instante se van a registrar con la aplicación móvil anteriormente definida GPSTracker como se puede ver en la gráfica 1, así se consigue conocer de forma más exacta la altura en metros a la que se encuentra el vehículo en casa instante.

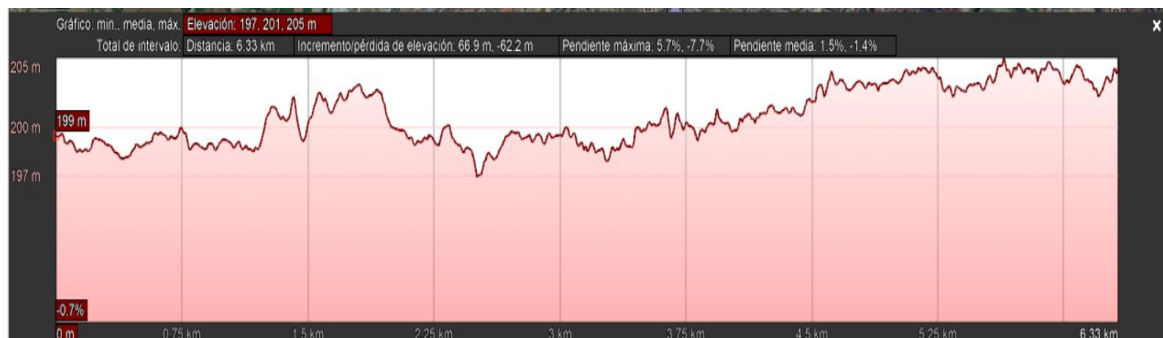
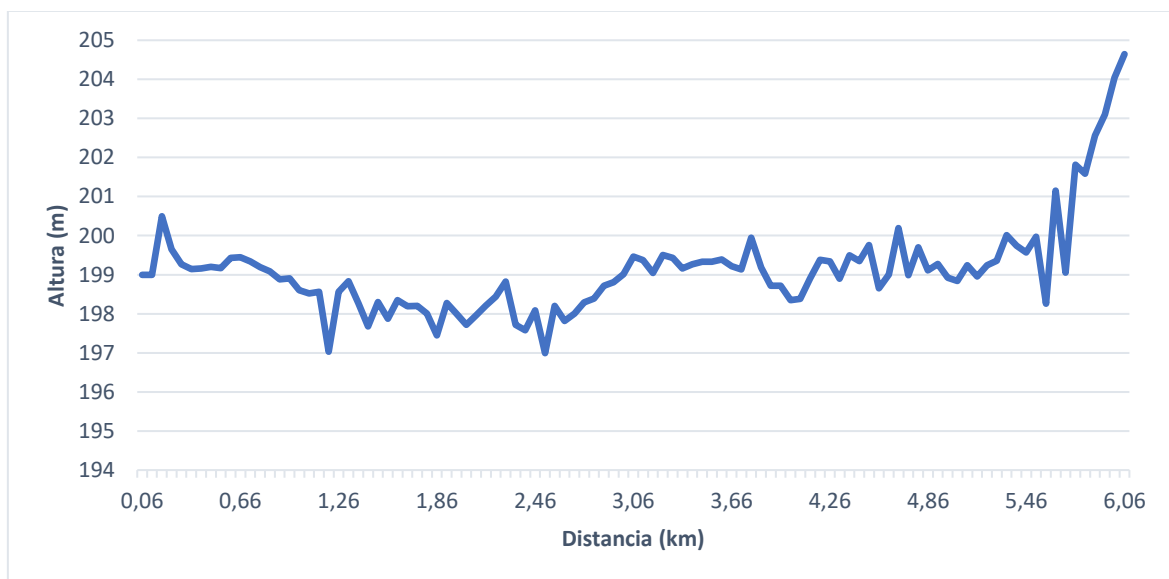


Ilustración 17 Perfil de elevación de la ruta. Fuente: Google Earth.



Gráfica 2 Perfil ruta Parque deportivo Ebro-Monzalbarba. Fuente: Propia.

5.3 Comprobación medidas de velocidad del viento

Por último se procedió a comprobar que los datos que se recogen del viento con el anemómetro colocado en la parte superior del coche se corresponden con el viento real que existe en el ambiente. Es decir, hay que asegurarse de que el viento no se acelera en la parte superior del vehículo de forma que altere los datos recogidos.

Para ello se utilizaron dos anemómetros. Uno de ellos colocado de la forma que se ha explicado anteriormente, en el techo, y otro a un metro de altura del coche, como se puede ver en la ilustración 18.

La distancia a la que se ha elegido colocar el segundo anemómetro se explica a partir del Trabajo fin de Grado de Iñaki Ibero Samaniego (realizado al mismo tiempo que este) acerca del sistema de adquisición de datos para la medida de fuerzas aerodinámicas en vehículos de carretera, en el que se detalla el proceso mediante simulaciones en el software SolidWorks, con las que se comprobó que a esta altura, la medida de velocidad del viento es correcta.

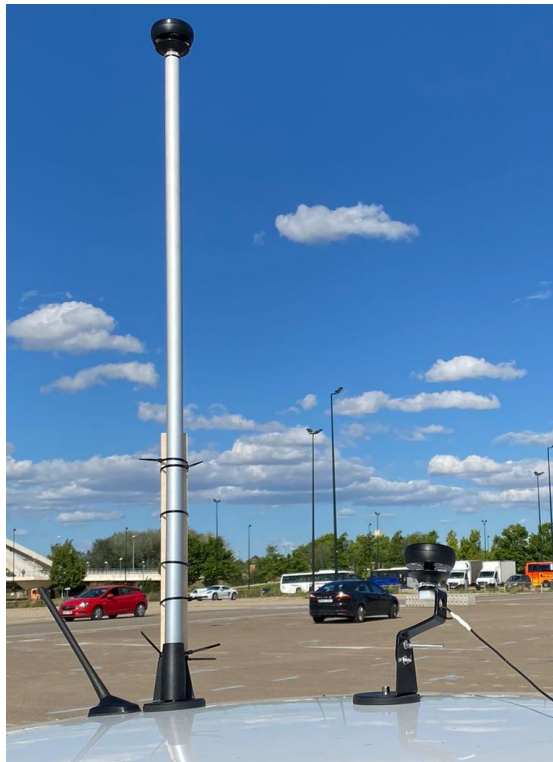
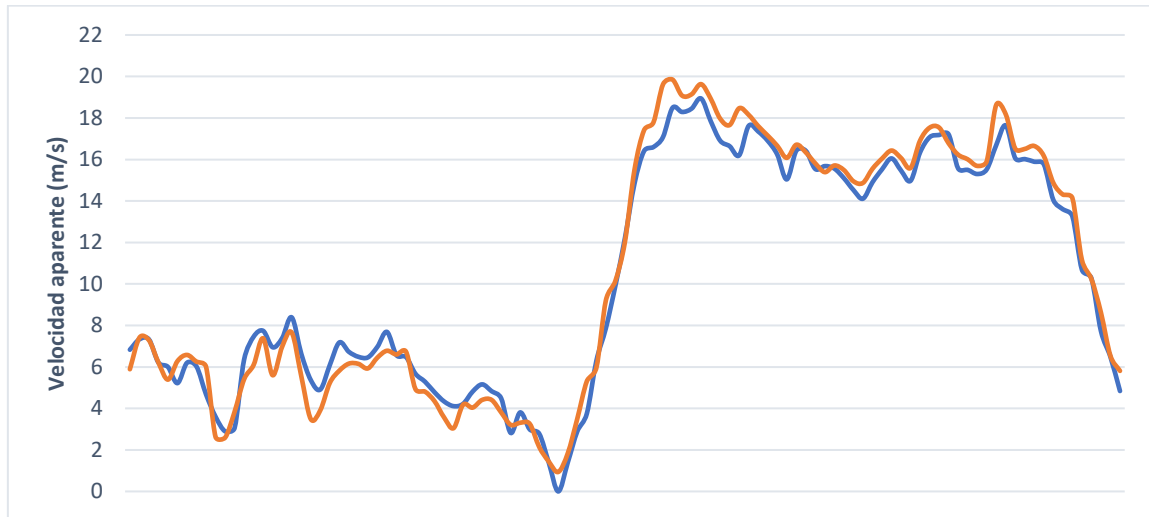


Ilustración 18 Dos anemómetros en el techo del vehículo para comprobar medidas viento. Fuente: Propia.

Una vez colocados, se realizaron trayectos, en los que se recogieron datos con los dos anemómetros y de esta forma se puede ver cómo en la gráfica 3 la velocidad aparente del viento en el techo del coche y a un metro de altura, coinciden en la forma. Sin embargo, la colocada a un metro es ligeramente superior, como era de esperar por las aceleraciones que se producen en la velocidad del viento debido a la forma del coche.



Gráfica 3 Velocidad del viento aparente a 1 metro (naranja) y en el techo del vehículo(azul). Fuente: Trabajo fin de grado Iñaki Ibero Samaniego.

Comprobadas que las medidas de viento que se van a recoger son correctas, o muy similares, se procedió a realizar los ensayos oficiales.

5.4 Realización de ensayos

Una vez introducido y desarrollado el modelo teórico de las resistencias que se oponen al avance de un vehículo en carretera, las herramientas de registro de datos en tiempo real, la ruta que se va a realizar y obtenida la forma óptima de realizar el ensayo, se procede a la realización de las pruebas en el vehículo.

Para ello en primer lugar, se tienen que colocar los instrumentos en el vehículo. Como se puede ver en las siguientes ilustraciones, se coloca el anemómetro junto con la ayuda de un imán, en la parte superior.



Ilustración 19 Instrumentalización vehículo de ensayo. Fuente: Propia.



Ilustración 20 Instrumentalización vehículo de ensayo. Fuente: Propia.

Además del anemómetro se coloca el OBD II, de la forma que se realizó en el coche de las pruebas.

Una vez instrumentalizado el turismo y con las aplicaciones móviles conectadas y registrando datos, se realizan un total de 6 viajes (ida y vuelta) entre la ruta establecida anteriormente. En la siguiente tabla se recogen los días en los que se realizaron los trayectos así como las condiciones meteorológicas que había, siendo estas de especial importancia para el estudio de las resistencias al avance, ya que no será lo mismo un día con lluvia que un día con sol y viento calmado.

DÍA	VELOCIDAD MEDIA VIENTO (km/h)	TEMPERATURA (°C)	CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS
15/04/2021	9,82	15	Despejado
20/04/2021	4,53	16	Nubes y claro
29/04/2021	8,70	23	Precipitaciones
06/05/2021	8,10	24	Despejado
11/05/2021	12,34	22	Precipitaciones
20/05/2021	42	23	Despejado

De esta forma se obtienen distintos valores de resistencias y se comparan las diferencias y los factores que influyen en ellas. Por ejemplo, no serán las resistencias al avance del vehículo igual un día en el que el viento incide con velocidad real 10 km/h y con precipitaciones, a un día de sol en el que el viento apenas llega a 5 km/h, ni un día que el vehículo circule a velocidades de entre 40-50 km/h y otro que lo haga entre 70-80 km/h.

6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

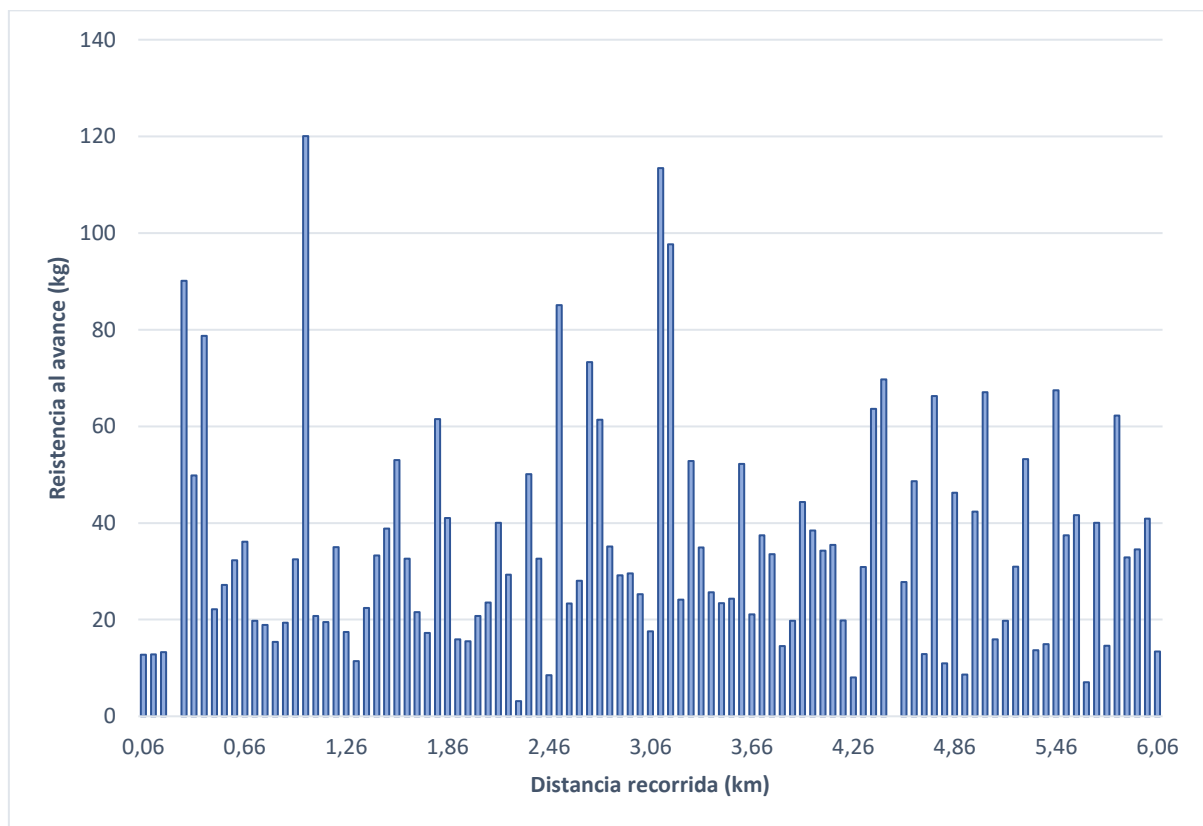
Una vez llevados a cabo los ensayos anteriormente detallados, y los cálculos para hallar el valor de cada una de las resistencias y de la energía necesaria que el motor debe aportar para vencer a estas, se procede a analizar:

- Cada una de las resistencias al avance del vehículo en uno de los trayectos realizados entre el Parque Deportivo Ebro (Zaragoza) y el barrio de Monzalbarba el día 20/04/2021, y observar cómo influyen en ellas cada uno de los factores.
- La resistencia aerodinámica que se produce en cada uno de los viajes, y la influencia que tiene en esta los diferentes factores; velocidad del viento real, dirección del viento real y velocidad del coche.
- El consumo de energía producido por cada una de las resistencias al avance y con mayor detalle el consumo que se produce por la incidencia del viento, es decir por la resistencia aerodinámica debida al viento frontal, y cómo influye cada uno de los parámetros.

6.1 Análisis de las resistencias al avance del vehículo

En primer lugar, tras la realización de los cálculos y de la suma de las resistencias al avance se recogen los datos obtenidos en los ensayos realizados en el anexo II (Resultado de las resistencias al avance en cada uno de los trayectos y la suma total).

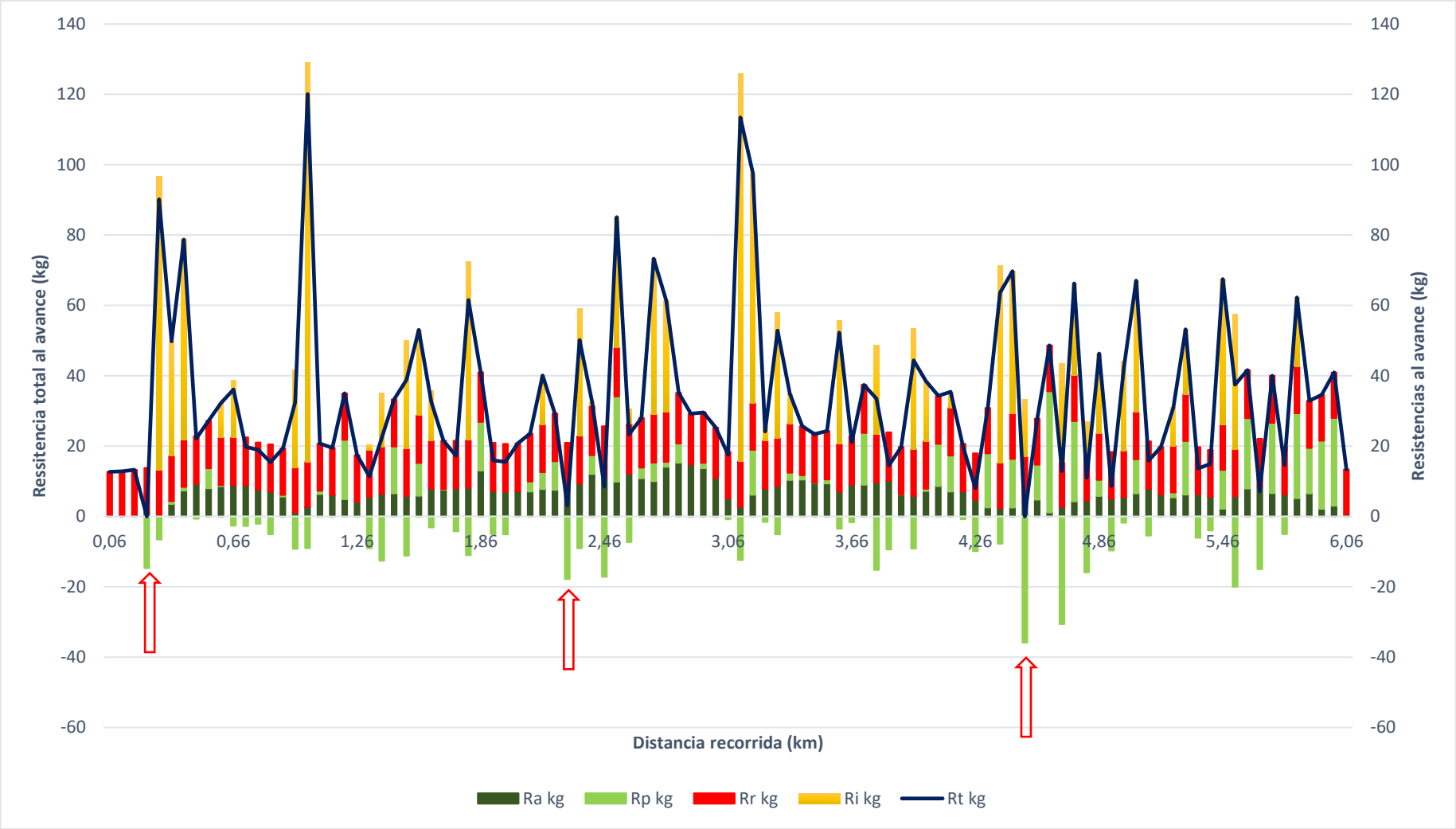
Analizando de forma detallada el trayecto realizado el día 20/04/2021, se observa en la gráfica 4 la resistencia total a vencer por el motor del vehículo en la ruta entre Zaragoza (Parque deportivo Ebro) y Monzalbarba.



Gráfica 4 Resistencia total vencida por el motor. Zaragoza-Monzalbarba (20/04/21). Fuente: Propia.

Se puede observar como el valor de resistencia total a vencer se encuentra en la mayoría de los puntos entre los valores de 10 kg y de 50 kg. También, existen puntos en los que esta aumenta considerablemente hasta valores superiores o en torno a 100 kg y otros puntos en los que toma el valor 0 kg.

Si se analiza la gráfica 5, en la que se muestra en el eje derecho la resistencia total a vencer por el motor y en el izquierdo el valor de cada una de las resistencias al avance acumuladas en columnas, se observan distintos puntos de interés.



Gráfica 5 Resistencia total a vencer por el motor frente a el valor de las resistencias al avance del vehículo. Zaragoza-Monzalbarba (20/04/21). Fuente: Propia.

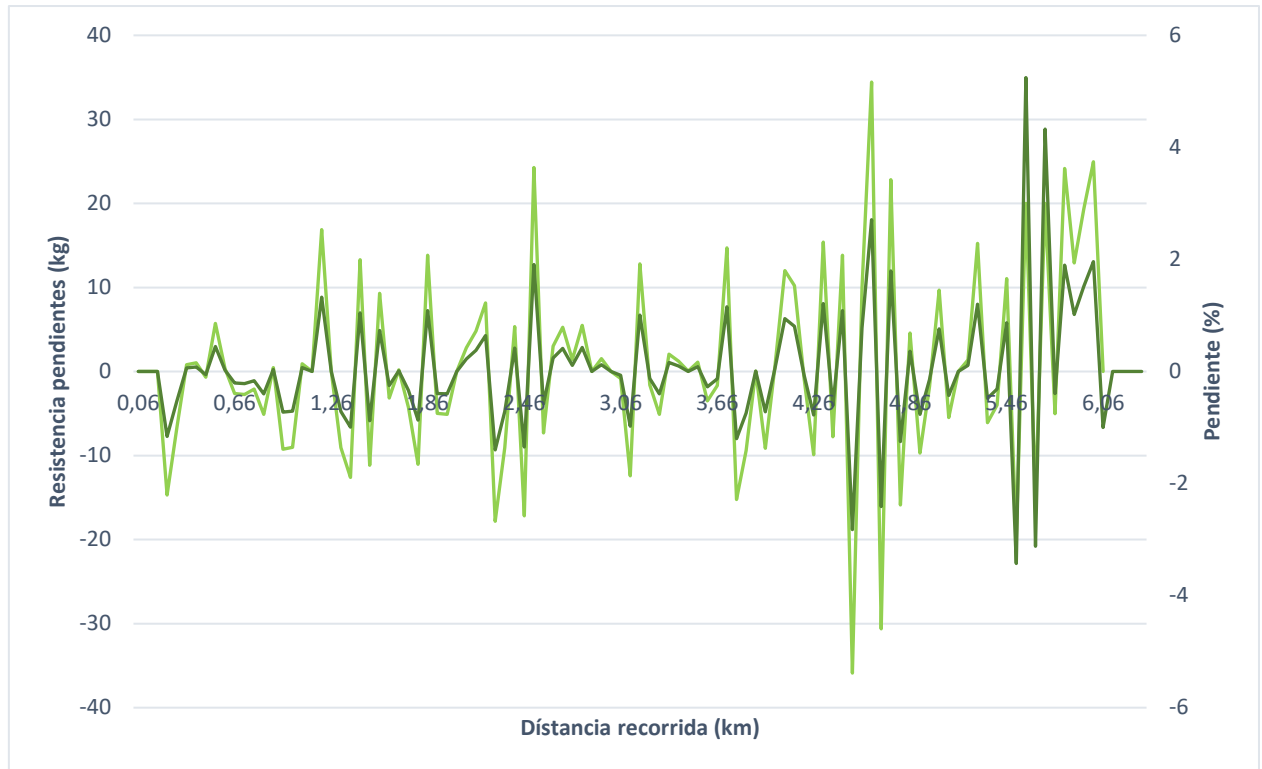
En primer lugar, hay puntos en los que la resistencia total es de 0 kg. Estos se deben a que el valor de resistencia a las pendientes es superior a la suma de la resistencia aerodinámica, resistencia a las inercias y resistencia de rodadura, como se indica con flechas rojas.

Se considera que el valor de la resistencia a las pendientes es negativo cuando el vehículo circula cuesta abajo, es decir en pendientes negativas, esto se puede observar en la gráfica 6 donde se han indicado con círculos rojos algunos puntos en lo que esto sucede. Como se ha desarrollado anteriormente, el valor de la resistencia a las pendientes depende de la pendiente y del peso del vehículo: $R_p(kg) = Peso_{total} * \frac{m}{100}$

El peso del vehículo es un valor constante que no cambia a lo largo del viaje, sin embargo, el valor de pendiente sí que lo hace, ya que tanto la altura del terreno como la distancia recorrida por el vehículo cambian. De esta forma se puede ver en la gráfica 6 que si se superponen el valor de resistencia a las pendientes y de la pendiente, los valores tanto mayores y menores de una y de otra coinciden, son proporcionales.



Gráfica 6 Resistencia a las pendientes. Zaragoza-Monzalbarba (20/04/21). Fuente: Propia.



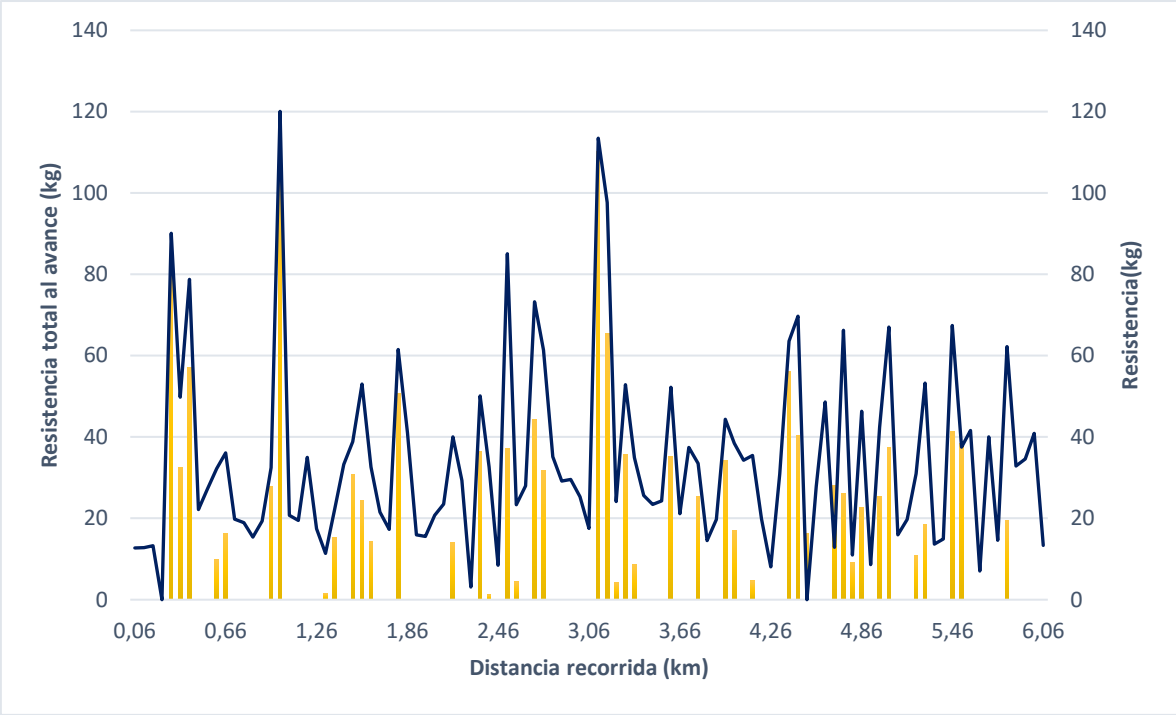
Gráfica 7 Resistencia a las pendientes (verde claro) frente a la pendiente (verde oscuro). Zaragoza-Monzalbarba (20/04/21). Fuente: Propia.

En segundo lugar, analizando aquellos puntos en los que el valor de resistencia total a vencer por el motor del vehículo toma valores altos, se observa que es debido a que, en estos, la resistencia de inercia a vencer es alta, como se ve en la gráfica 8, ya que el vehículo se encontró con obstáculos en la ruta, tales como ciclistas u otros coches en sentido contrario. Se debe a que la ruta elegida como se explicó con anterioridad, aunque tiene un tráfico mínimo, es frecuentada por ciclistas y propietarios de terrenos de la zona.

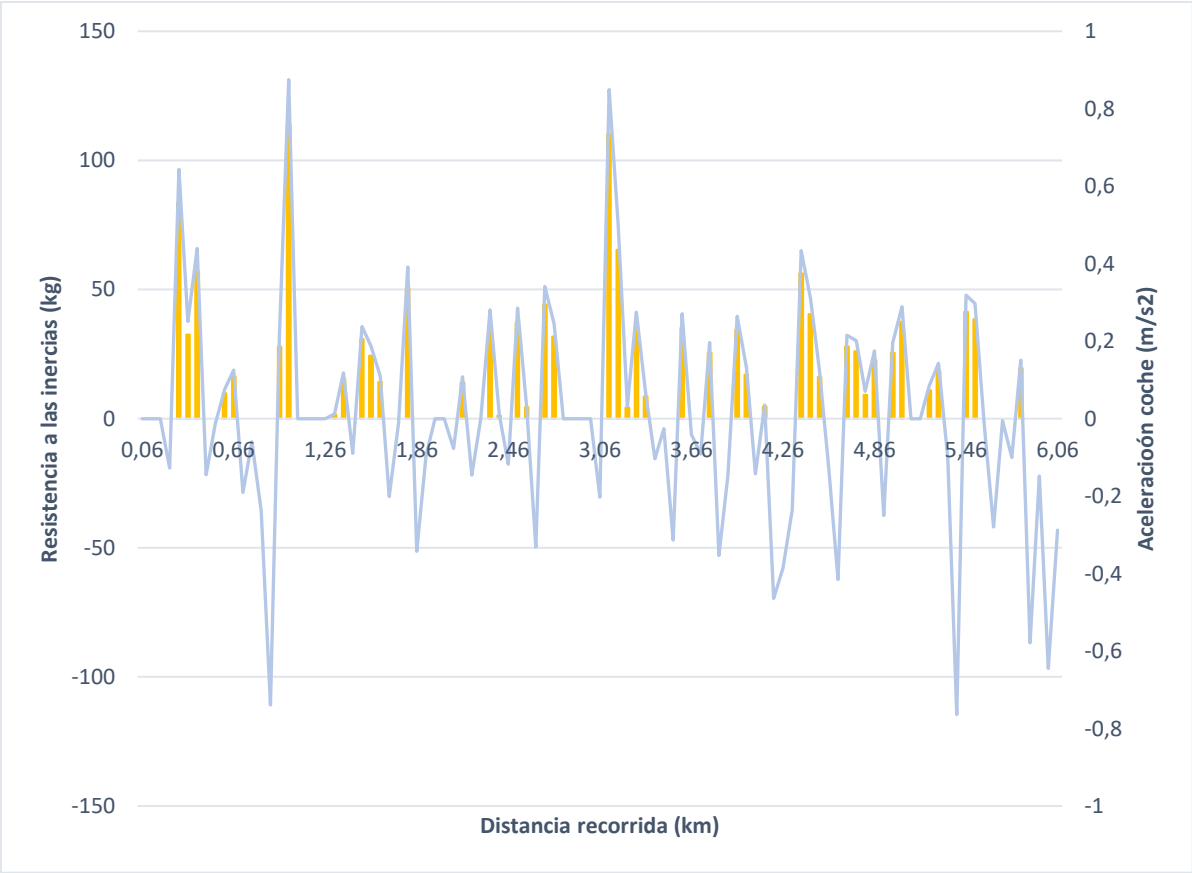
Es sabido que la resistencia a las inercias depende del peso del vehículo, que se mantiene constante, y de la aceleración del vehículo:

$$Ri(kg) = Aceleracion * \frac{Peso_{total}}{9,8}$$

Así superponiendo el valor de aceleración del coche durante el trayecto a el de resistencia a las inercias se observa como los picos son proporcionales en la gráfica 9, además de que aquellos puntos en los que la aceleración toma valores negativos, el valor de la resistencia a las inercias es 0 kg, ya que no tendrá en este caso influencia en el consumo, ya que supondría un aporte de combustible, y eso no es razonable.



Gráfica 8 Resistencia a las inercias (amarillo) frente a la resistencia total al avance (azul). Zaragoza-Monzalbarba (20/04/21). Fuente: Propia.



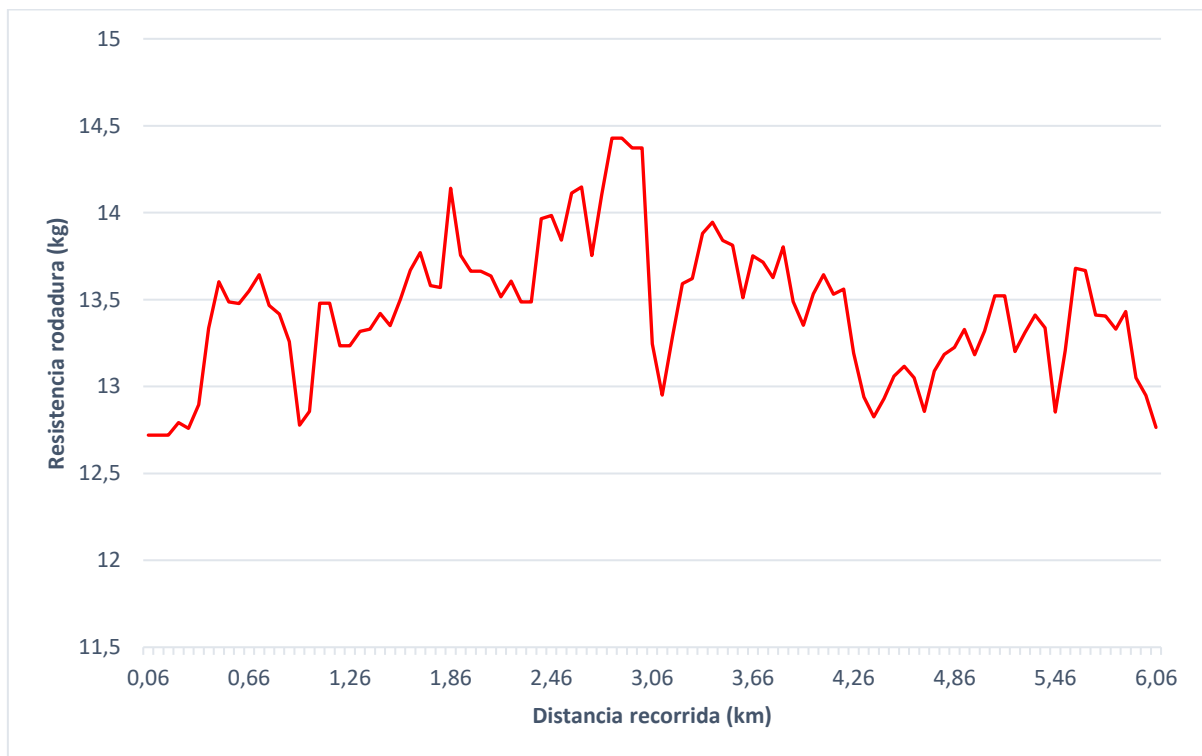
Gráfica 9 Resistencia a las inercias (amarillo) frente a la aceleración del coche (azul). Zaragoza-Monzalbarba (20/04/21). Fuente: Propia.

Por último, se analiza el valor de resistencia de rodadura en el trayecto. En primer lugar, la gráfica 10, muestra el valor de resistencia de rodadura en cada punto de la ruta, que tomará una forma muy similar en todos los trayectos (gráfica 12) ya que como se ha detallado con anterioridad, esta depende del peso del vehículo, que se mantiene constante y del coeficiente de rodadura que tan solo varía debido a la velocidad del coche.

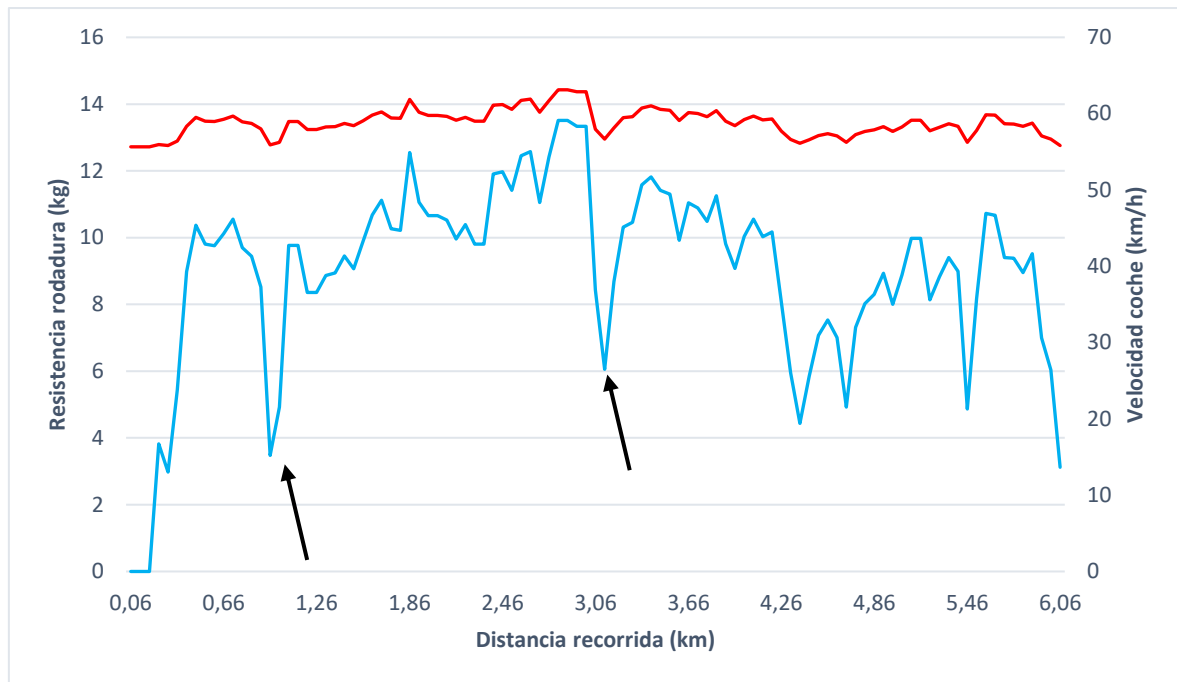
Por lo que lo único a destacar de esta es que las variaciones que se producen entre los valores de 12,5 y 14,5 son debidas únicamente al cambio que se produce en la velocidad del vehículo. Para corroborarlo, en la gráfica 11 se superponen las gráficas de resistencia de rodadura y de velocidad del coche, recalcando con flechas negras que los cambios de velocidad del vehículo coinciden con los cambios en la resistencia. Recordando las fórmulas:

$$Rr (kg) = coef_{rozamiento} * Peso_{total}$$

$$\mu = (0,010 + 0,005((v [km/h]) / 100)^{2,5})$$



Gráfica 10 Resistencia de rodadura. Zaragoza-Monzalbarba (20/04/21). Fuente: Propia.



Gráfica 11 Resistencia de rodadura (rojo) frente a velocidad del coche (azul). Zaragoza-Monzalbarba (20/04/21). Fuente: Propia.



Gráfica 12 Resistencia de rodadura de tres días distintos. Fuente: Propia.

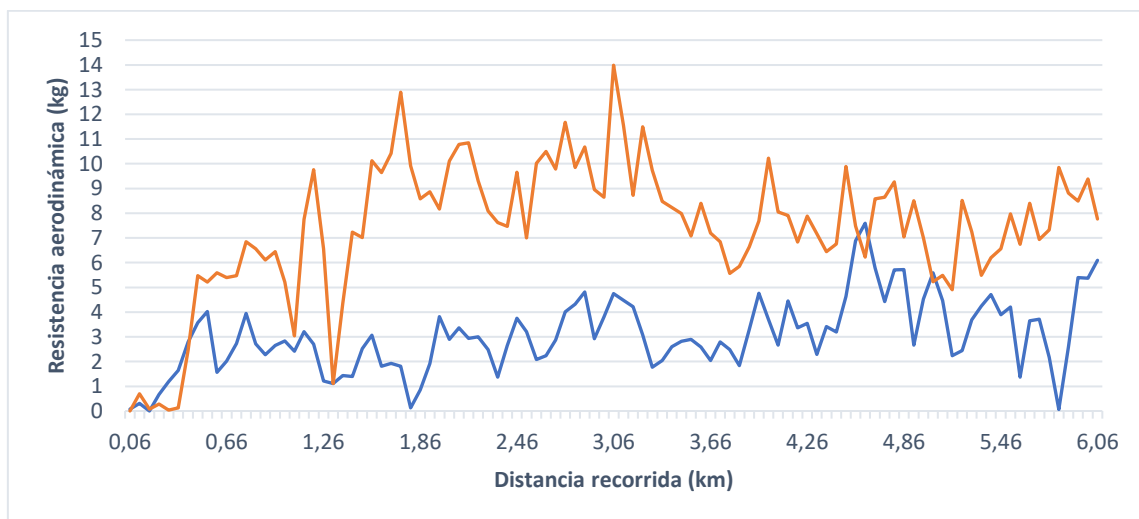
6.2 Análisis de la resistencia aerodinámica en los viajes realizados

Una vez analizadas las distintas resistencias al avance del vehículo, se procede a poner mayor detalle a la resistencia aerodinámica, ya que es el principal objeto de estudio de este trabajo.

6.2.1 Análisis de la influencia de la velocidad del vehículo y del viento en la resistencia aerodinámica

Como se ha explicado con anterioridad, la resistencia aerodinámica dependerá de tres factores principales, la velocidad del coche, la velocidad real del viento en la dirección de avance del vehículo y del ángulo de incidencia real del viento.

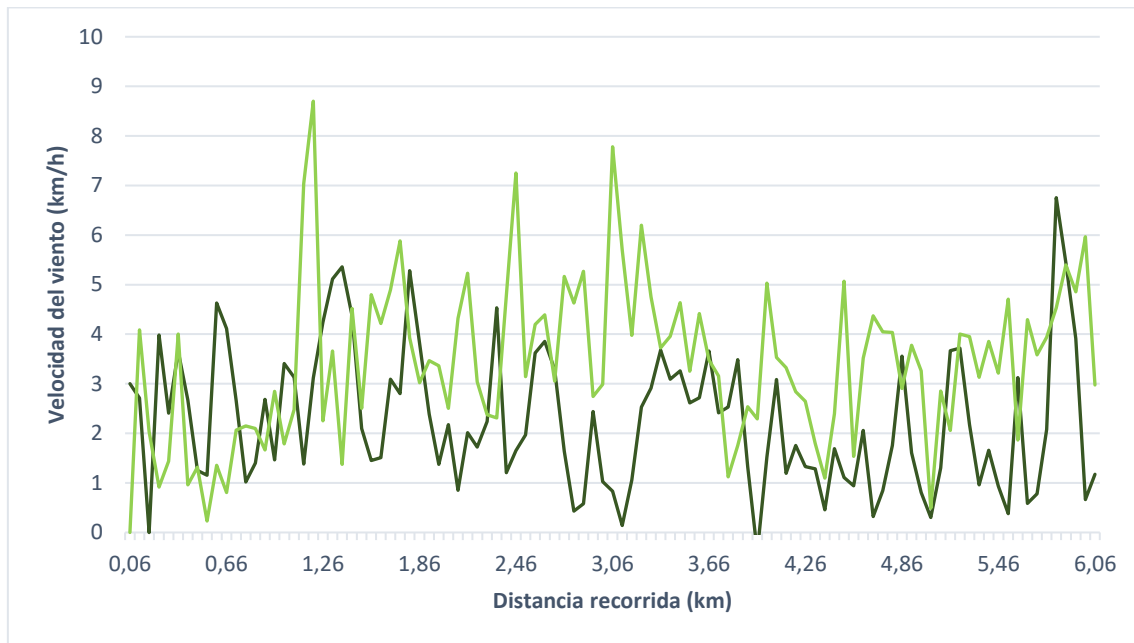
Se comienza analizando los resultados de resistencia aerodinámica obtenidos en el viaje realizado el 11/05/21 ya que se observan diferencias a resaltar. En la gráfica 13 se ve que el valor de resistencia aerodinámica en el viaje de ida (Zaragoza-Monzalbarba) es mucho mayor que el valor del trayecto de vuelta (Monzalbarba-Zaragoza). La media del valor de resistencia aerodinámica del viaje de ida es de 7,41 kg y el de vuelta de 3,04 kg.



Gráfica 13 Valores de Resistencia aerodinámica. Zaragoza-Monzalbarba (naranja). Monzalbarba-Zaragoza (azul). (11/05/21) Fuente: Propia.

Para explicar por qué sucede esto hay que fijarse en los factores influyentes. En primer lugar deteniéndonos en la velocidad que llevaba el coche en cada viaje se ve que la diferencia no es grande, en el viaje de ida la media fue de 34,76 km/h y en el de vuelta de 35,79 km/h.

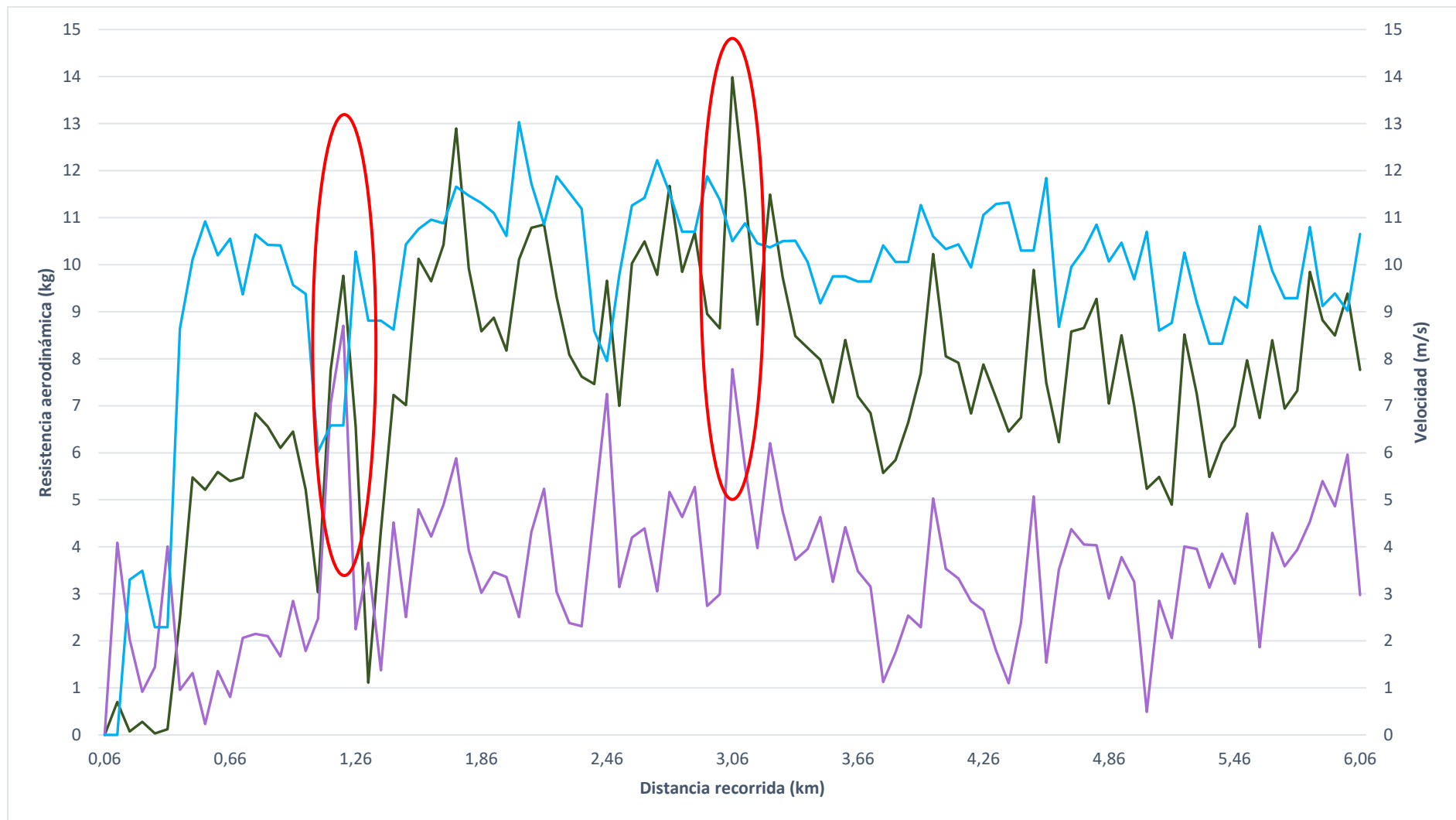
Así pues, se pasa a analizar el valor de velocidad del viento. En este parámetro existe la primera gran diferencia, el valor medio del viaje de ida fue de 12,34 km/h y en el de vuelta de 8,1 km/h, aproximadamente 3 km/h menor. Esto queda visible en la gráfica 14.



Gráfica 14 Valor de velocidad del viento. Zaragoza-Monzalbarba (verde claro). Monzalbarba-Zaragoza (verde oscuro). (11/05/21) Fuente: Propia.

Visto esto, es factible decir que la velocidad del viento tiene una influencia mayor en el valor de resistencia aerodinámica que la velocidad que lleva el vehículo, de tal forma que cuando toma valores altos, esta aumenta de forma proporcional. Esto se puede ver en la gráfica 15, en la que se superponen las tres curvas (velocidad del viento, del coche y resistencia aerodinámica). Se analiza el valor de velocidad del viento y del vehículo en m/s para que la gráfica sea más representativa, ya que si se hace en km/h, no se observan los puntos característicos de manera clara. Por lo que cuando el valor de resistencia aerodinámica es alto, es producido porque la velocidad real del viento toma valores altos en ese instante (círculo rojo), y no está tan influenciado por la

velocidad del coche, que toma valores constantes durante todo el viaje. Esto es algo que se repite en los demás trayectos.

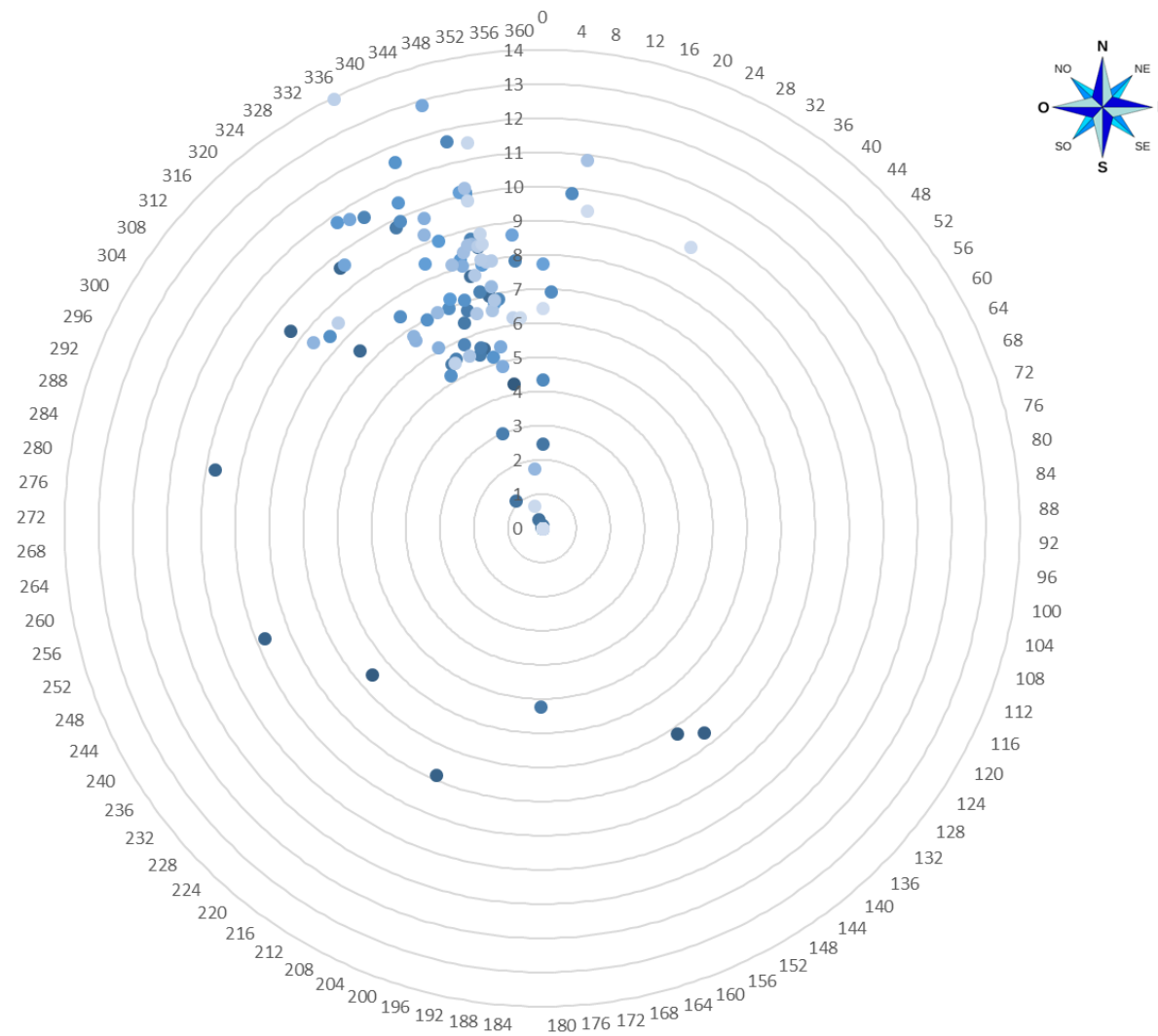


Gráfica 15 Resistencia aerodinámica (verde) contra la velocidad del viento (morado) y del coche (azul). Zaragoza-Monzalbarba. (11/05/21). Fuente: Propia

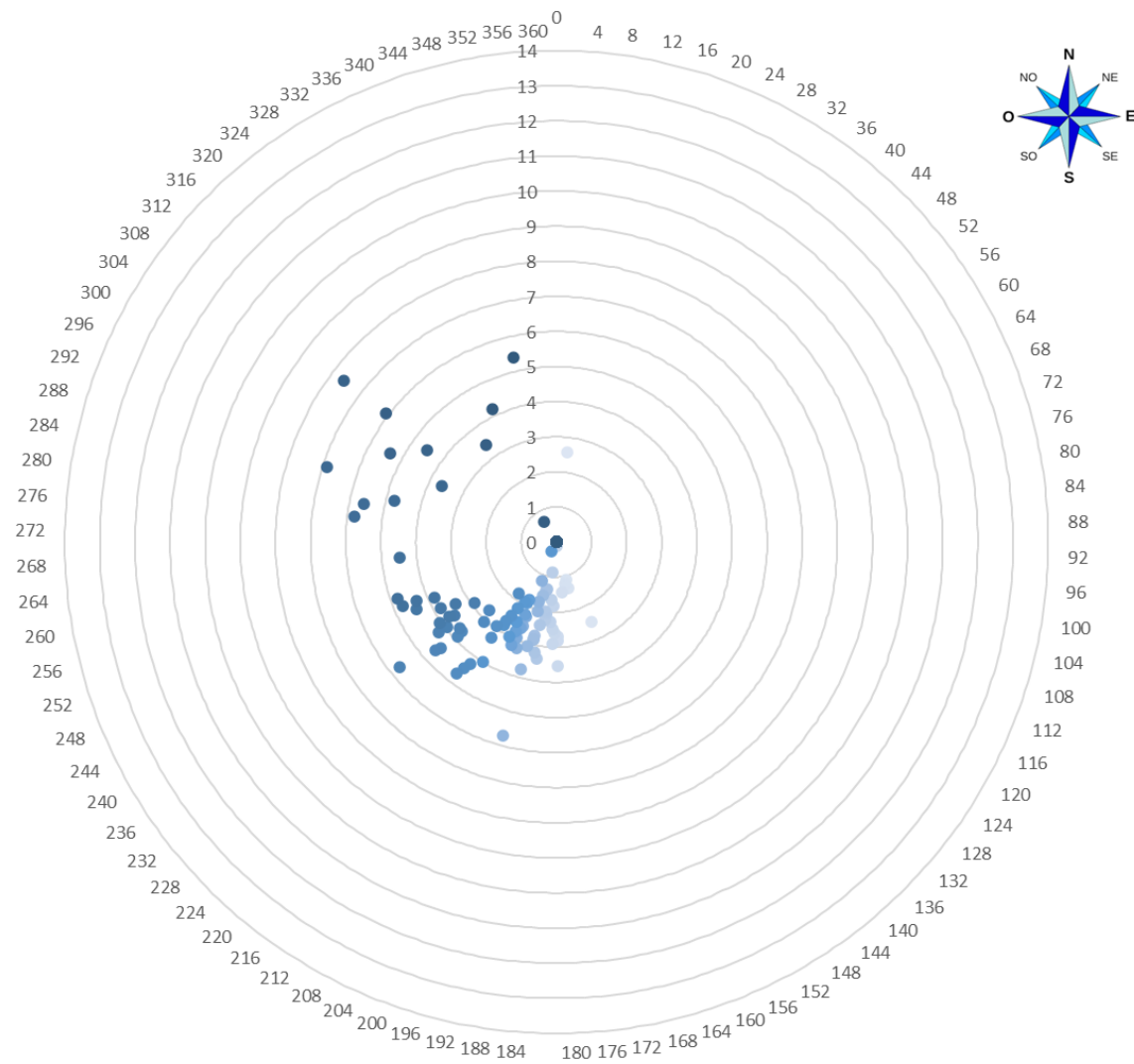
6.2.2 Análisis de la influencia del ángulo de incidencia real del viento en la resistencia aerodinámica

Otro elemento que estudiar es el valor del ángulo real de incidencia del viento en el vehículo. Este es un factor muy importante, ya que como es de esperar, cuando es contrario a la dirección que lleva el vehículo, el valor de resistencia al avance aerodinámica va a ser mayor, y cuando el ángulo sea coincidente con la dirección de avance del vehículo, servirá de ayuda, en lugar de entorpecerlo.

Para ver que esto es cierto, se procede a analizar el valor obtenido en los viajes realizados el 11/05/21. Como se ha observado en el apartado anterior, el valor de resistencia aerodinámica en el trayecto de ida era muy superior que el de vuelta. En la gráfica 16 y 17 se representa el valor de resistencia al avance aerodinámica en función de la dirección (ángulo) de incidencia del viento, que varía entre 0 y 360 grados. En la parte superior derecha del gráfico se superpone la rosa de los vientos, que es un símbolo en forma de círculo que tiene marcado alrededor los rumbos en que se divide la circunferencia del horizonte, y que serían este, oeste, norte y sur, para conocer en cada instante la dirección predominante del viento.



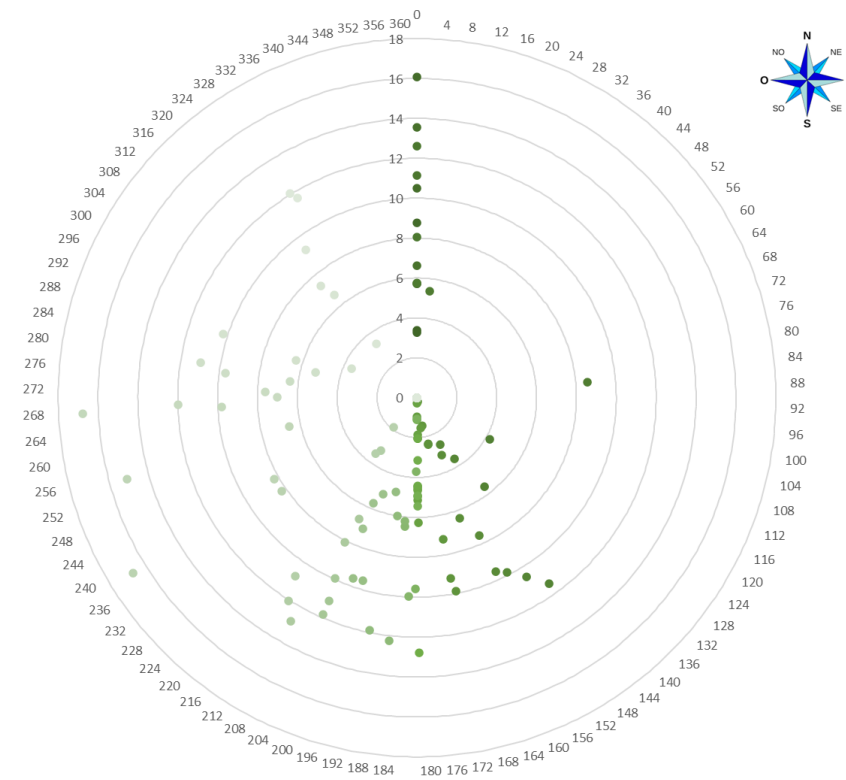
Gráfica 16 Resistencia aerodinámica (eje vertical) en función del ángulo de incidencia real del viento. Zaragoza-Monzalbarba (11/05/21) Fuente: Propia.



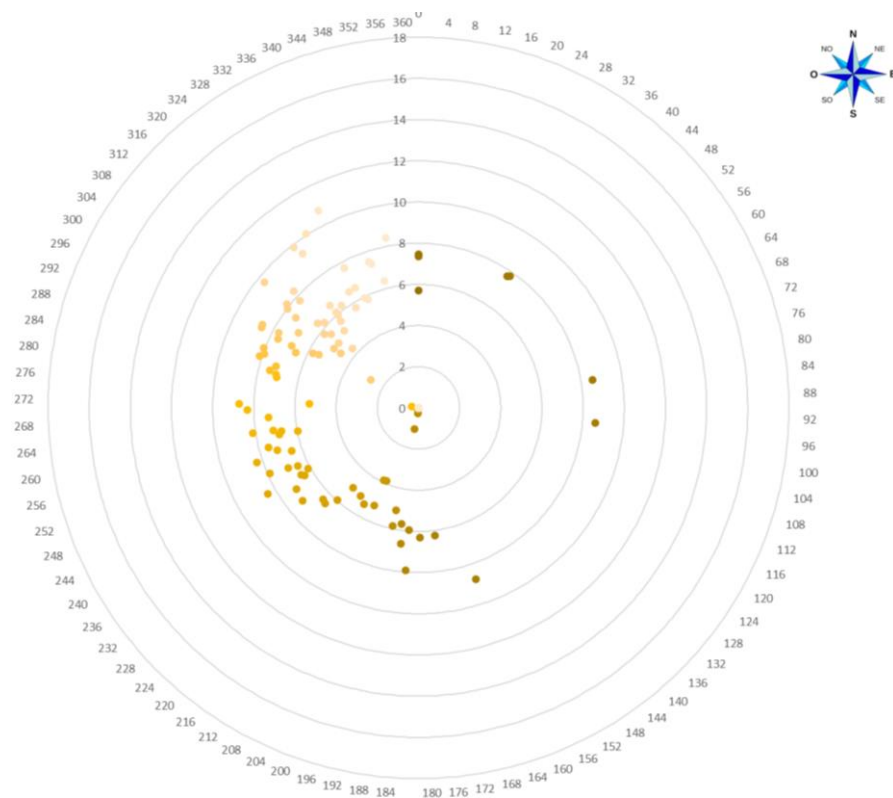
Gráfica 17 Resistencia aerodinámica (eje vertical) en función del ángulo de incidencia real del viento. Monzalbarba-Zaragoza. (11/05/21). Fuente: Propia.

Estas gráficas proporcionan mucha información. En primer lugar es visible como en el trayecto de ida, la dirección del viento predominante es la norte, es decir, en oposición a la dirección del avance del vehículo, y en el trayecto de vuelta el viento venía de cola, es decir en la misma dirección de avance al vehículo. Es por esto por lo que los valores de resistencia aerodinámica son mucho mayores en el trayecto de ida que en el de vuelta. Por lo que cuanto más próximo es el valor del ángulo real del viento a la dirección norte, mayor es el valor de la resistencia aerodinámica.

Estudiando las gráficas obtenidas en los demás viajes realizados, que se añaden en el anexo V (Gráficas de resistencia aerodinámica en función del ángulo de incidencia real del viento real en cada uno de los trayectos), se puede observar cómo en alguno de ellos el viento predominante es en la dirección suroeste o sureste. En este caso no influye en la resistencia al avance aerodinámica de forma notable, sino que afectará a la resistencia aerodinámica lateral. Esto implica que la estabilidad del vehículo disminuye, es decir afecta a la seguridad de la conducción. Algunos ejemplos se pueden ver reflejados en las gráficas 18 y 19, que corresponden con datos recogidos en distintos días. Sin embargo, este aspecto de estabilidad del coche no es de mayor interés en este trabajo, ya que no es objeto de estudio.



Gráfica 18 Resistencia aerodinámica (eje vertical) en función del ángulo de incidencia real del viento.
Viaje Monzalbarba-Zaragoza. (29/04/21) Fuente: Propia.



Gráfica 19 Resistencia aerodinámica (eje vertical) en función del ángulo de incidencia real del viento.
Viaje Monzalbarba-Zaragoza. (06/05/21) Fuente: Propia.

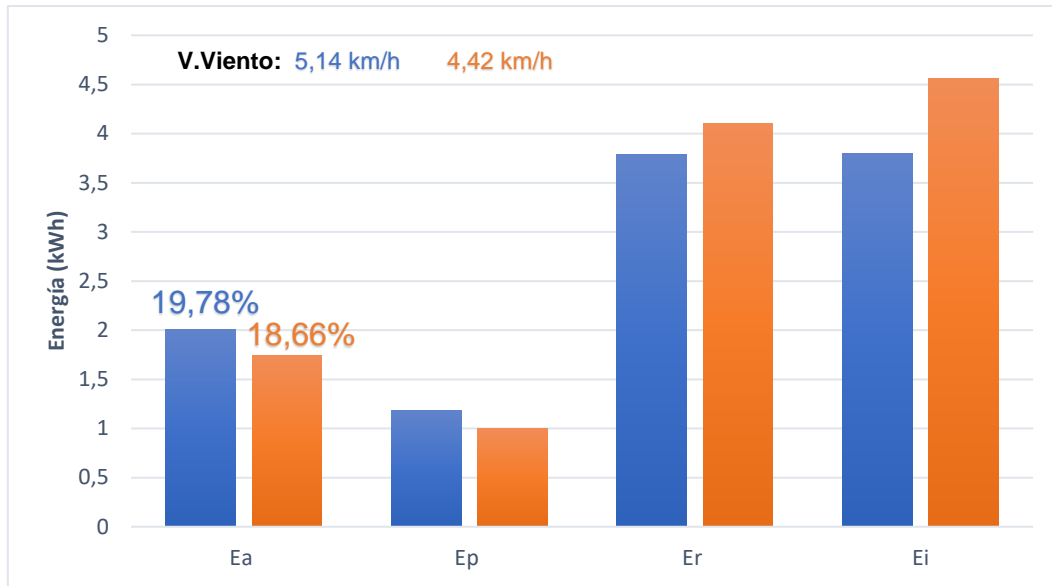
6.3 Análisis de la energía necesaria para vencer las resistencias al avance

El objetivo principal de este trabajo, como se ha comentado con anterioridad es la optimización de la energía que consume el vehículo gracias a el conocimiento de las resistencias al avance y a los factores que influyen en ellas. Es por esto por lo que se ha procedido al cálculo de la energía necesaria, es decir, del combustible que necesita aportar el motor para vencer cada una de las resistencias en los viajes realizados.

Para esto, se analiza la cantidad de energía en kWh que tiene que aportar el motor para vencer cada una de las 4 resistencias al avance.

A continuación, se representan los datos de energía debida a cada una de las resistencias al avance en la gráfica 20, correspondientes a los trayectos realizados el 20/04/21.

En esta se observa cómo tanto la de rodadura (E_r) como la de inercia (E_i) son las que más energía consumen. Por contrario, la energía referida a las pendientes la que menos (E_p). Estas primeras observaciones son comunes en casi todos los viajes realizados ya que, tanto la resistencia de rodadura como la de pendientes mantienen valores casi constantes en todos, como se ha explicado en el apartado de análisis de estas.

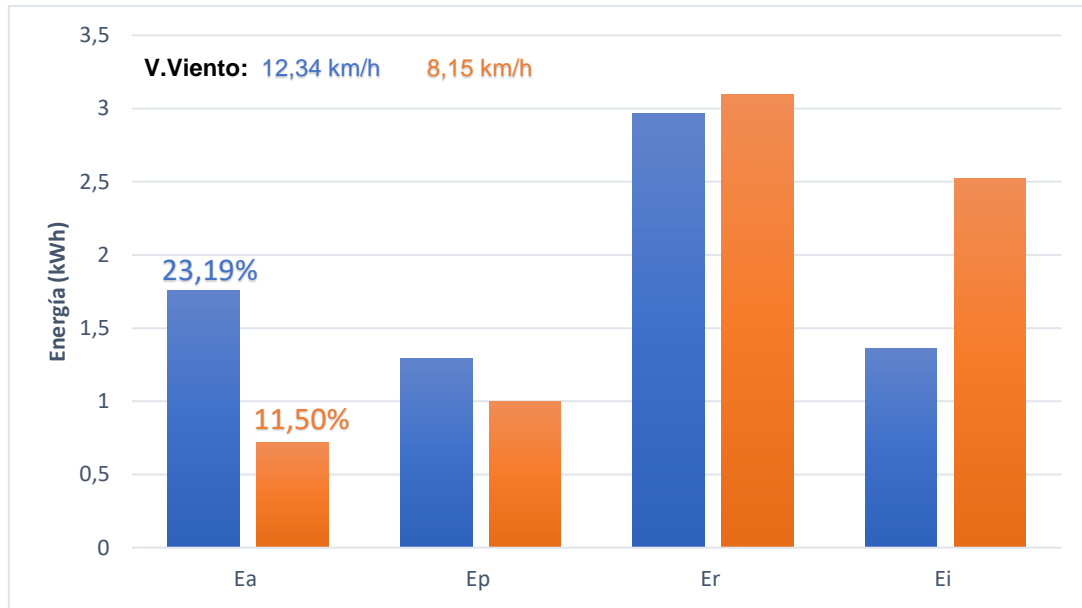


Gráfica 20 Valor de energía consumida debida a cada una de las resistencias al avance. Día 20/04/21. Zaragoza-Monzalbarba (azul) Monzalbarba-Zaragoza (naranja). Fuente: Propia.

Por otro lado la energía consumida por la resistencia aerodinámica mantiene valores de entorno a un cuarto de la energía total correspondiente a las resistencias de avance al vehículo, en concreto un 19,78 % de la energía total aportada por el motor para vencer las resistencias al avance se corresponde a esta en el viaje de ida y un 18,66% en el de vuelta.

Estudiando de manera más detallada a lo que atiene a este trabajo, que es el consumo de energía debido a la resistencia aerodinámica se observan distintos aspectos a considerar. En el caso de la gráfica 20, el valor de energía consumida debida a la resistencia aerodinámica es ligeramente superior en el viaje de ida, debido a que en este la velocidad real del viento era ligeramente superior, de 5,14 km/h a diferencia del de vuelta que se mantuvo en torno a 4,42 km/h.

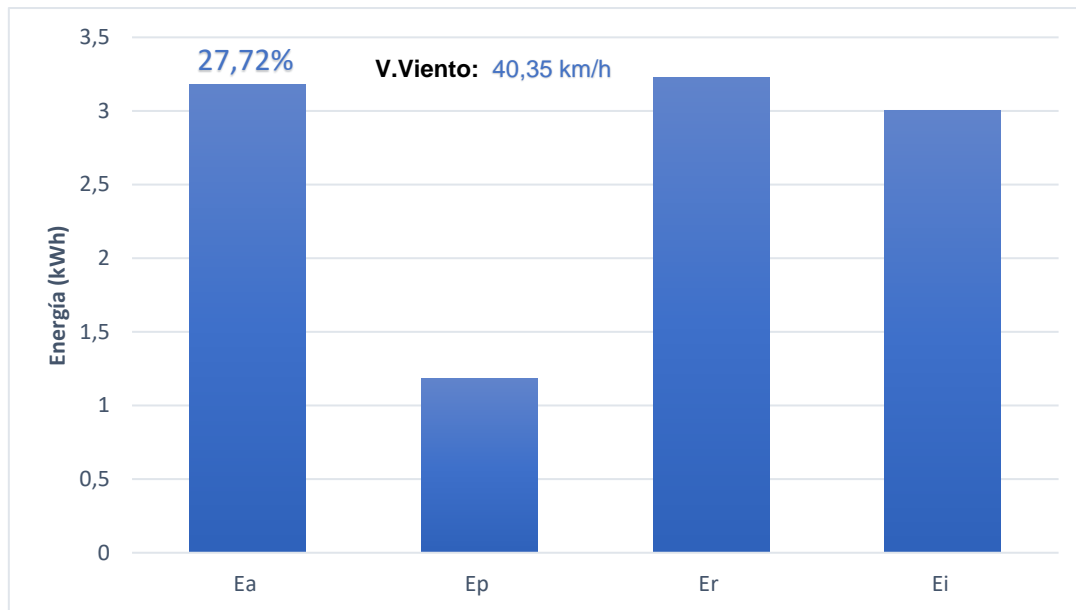
Sin embargo, estos resultados no son clarividentes en cuanto a las diferencias que existen y porqué en el valor de energía consumida debido a la resistencia aerodinámica, ya que a parte de las velocidades, existe la influencia del ángulo de incidencia del viento como se ha analizado en el apartado de resistencia aerodinámica. Es por ello por lo que se representan los valores obtenidos el día 11/05/21 en la gráfica 21.



Gráfica 21 Valor de energía consumida debida a cada una de las resistencias al avance. Día 11/05/21. Zaragoza-Monzalbarba (azul) Monzalbarba-Zaragoza (naranja). Fuente: Propia.

En estas se observa una diferencia notable en el valor de % energía consumida por la resistencia aerodinámica (E_a). En el viaje de ida este asciende hasta casi un 24 % y en el de vuelta se corresponde con un 11,50 %. En primer lugar esto es debido a que la velocidad media real del viento era superior en el primer trayecto, de 12,34 km/h y en el segundo de 8,136 km/h. Sin embargo la diferencia fundamental se encuentra en el ángulo de incidencia real del vehículo, que como se ha analizado con anterioridad, tenía la dirección norte como predominante en el viaje de ida y la dirección sur en el de vuelta (gráficas 16 y 17).

Para corroborar la importancia de este análisis y la búsqueda de su optimización, se introduce por último la gráfica 22 que se corresponde con el trayecto de ida realizado el 20/05/21 a una velocidad media del vehículo de 40 km/h, (para que sea comparable con los días anteriores), en el que la velocidad media del viento fue superior a lo normal, de 40,35 km/h.



Gráfica 21 Valor de energía consumida debida a cada una de las resistencias al avance. Día 20/05/21.
Fuente: Propia.

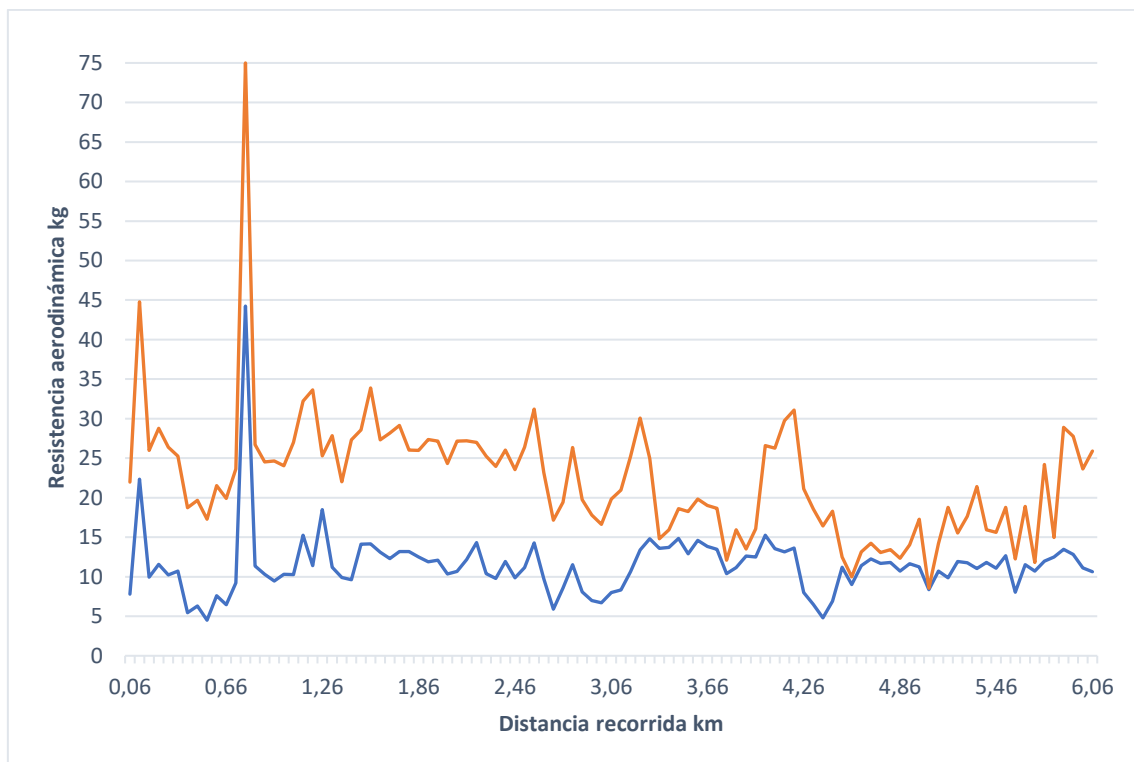
En esta se ve como el valor de % de energía debido a la resistencia aerodinámica (Ea) asciende hasta casi un 28%, debido a la alta velocidad del viento y la dirección norte predominante que llevaba este.

Así pues, queda notablemente demostrado la importancia de analizar la influencia de la resistencia aerodinámica en el vehículo, ya que consume (en los casos menos desfavorables) en torno a un cuarto del combustible que se proporciona para las resistencias al avance del vehículo, aumentando considerablemente en aquellas situaciones en las que la velocidad del viento es alta y sobre todo la dirección de este opuesta al movimiento del vehículo.

6.4 Análisis de la influencia del cambio de velocidad del coche en la resistencia aerodinámica y la energía consumida

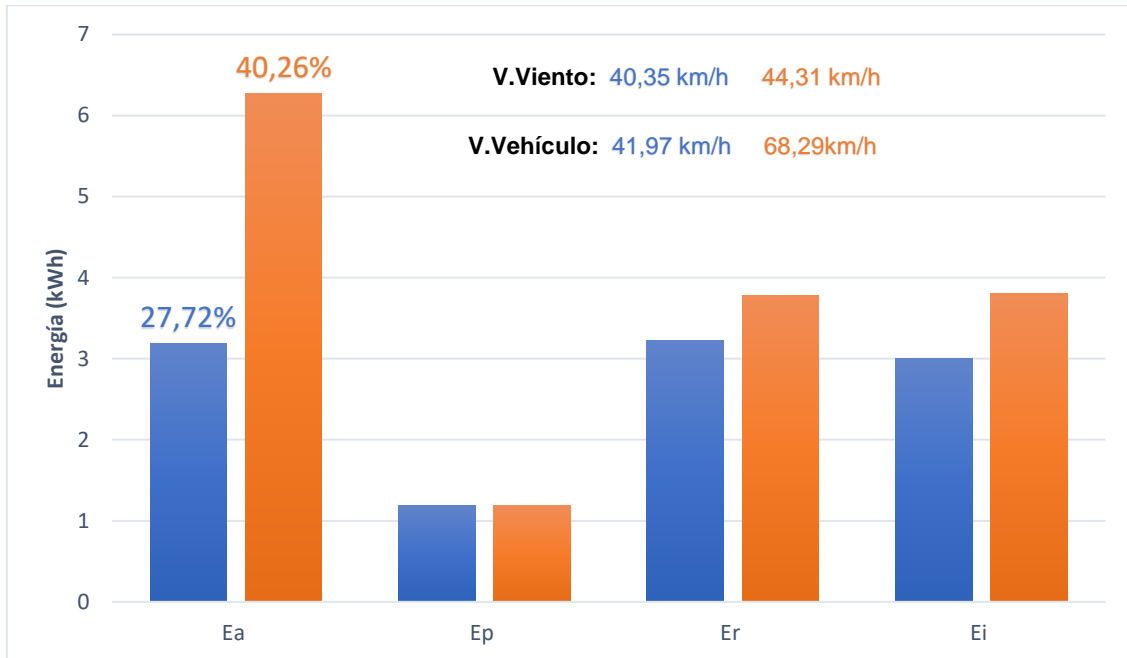
Llevados a cabo los primeros viajes y los cálculos correspondientes, se cayó en la cuenta de que si se variaba la velocidad del vehículo, el valor de resistencia aerodinámica disminuía considerablemente, además de que si se realizaban pruebas días con la velocidad del viento más alta, los resultados serían más clarividentes. Así pues se analiza el viaje realizado el 20/05/21, en el que la velocidad media del viento real fue superior a los anteriores, de 44,28 km/h.

Aprovechando la fuerza que tenía el viento este día, se realizó el trayecto de ida con una velocidad media superior en torno a los 70 km/h y otro con una de 40 km/h. Como se puede ver en la gráfica 23, el valor de resistencia aerodinámica es considerablemente mayor en el primero.



Gráfica 22 Valores de resistencia aerodinámica. Velocidad del vehículo media 70 km/h (naranja). Velocidad del vehículo media 41 km/h (azul). (20/05/21). Fuente: Propia.

Por lo que si con estas características se ve que a mayor velocidad del coche, mayor valor de resistencia aerodinámica, el valor de energía consumida por esta aumentará de la misma forma como se representa en la siguiente gráfica.



Gráfica 23 Valores de energía consumida por cada resistencia. (20/05/2021). Fuente: Propia.

De esta forma queda demostrado como una disminución de la velocidad del vehículo con las mismas condiciones de velocidad del viento y de dirección de incidencia de este, disminuye el consumo de energía y en consecuencia el de combustible consumido en el vehículo, en este caso de gasolina.

El ahorro se sitúa en casi un 13% de energía (en kWh) que el motor es necesario que aporte, como se puede deducir de la diferencia de porcentajes de energía aerodinámica.

6.5 Análisis del consumo de combustible debido a la resistencia aerodinámica frontal en cada viaje

A continuación, con los datos de energía consumida en kW/h, se obtiene el valor de combustible instantáneo en L/100km y entre medio el total de litros de gasolina consumidos, debido a la resistencia aerodinámica al avance. Para el vehículo en el que se han llevado a cabo las pruebas, se utiliza el valor de densidad y de poder calorífico superior de la gasolina, que se corresponden con 0,680 kg/L y 44,257 MJ/kg respectivamente. Con estos se halla el valor del poder calorífico superior de la forma:

$$PCS \left(\frac{MJ}{kg} \right) = 0,680 \left(\frac{kg}{l} \right) * 44,257 \left(\frac{MJ}{kg} \right) = 30,0953 \text{ (ec. 21)}$$

Con el valor anterior, y el valor de energía consumida en MJ en cada instante que se ha hallado con anterioridad, se calcula el consumo de combustible en L/100km:

$$Consumo \left(\frac{L}{100km} \right) = \frac{Energía(MJ)}{PCS \left(\frac{MJ}{kg} \right)} * \frac{100km}{6,36km} \text{ (ec. 22)}$$

Con los viajes que se han realizado, se analizan los resultados de los distintos días. En primer lugar en la tabla 5 se muestran los obtenidos en los viajes Zaragoza (Parque deportivo Ebro)-Monzalbarba y en la tabla 6 los obtenidos en la dirección Monzalbarba-Zaragoza (Parque deportivo Ebro). Cabe destacar que los datos de ángulo de incidencia, que se tienen en cuenta para analizar las diferencias después, quedan representados los de todos los trayectos en las gráficas del anexo V (Gráficas de resistencia aerodinámica en función del ángulo de incidencia del viento real en cada uno de los trayectos)

Tabla 4 Valores de consumo de combustible en cada viaje Zaragoza-Monzalbarba. Fuente: Propia

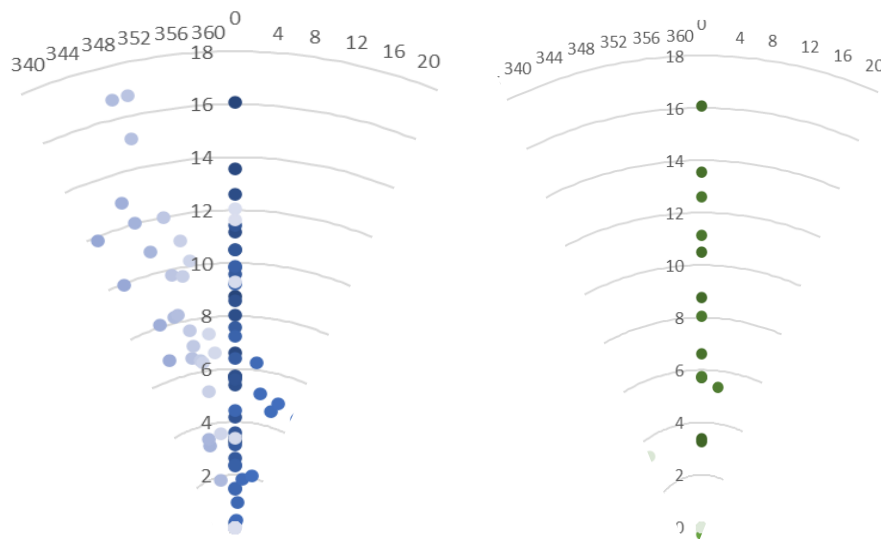
DÍA	VELOCIDAD MEDIA REAL VIENTO FRONTAL (KM/H)	VELOCIDAD MEDIA DEL COCHE (KM/H)	LITROS DE GASOLINA	CONSUMO MEDIO DE GASOLINA (L/100KM)
15 /04/21	9,82	38,20	0,0234	0,00387
20/04/21	4,53	39,52	0,0241	0,00380
29 /04/21	8,71	34,74	0,0183	0,00380
6 /05/21	8,12	36,43	0,0194	0,00320
11/05/21	12,34	34,76	0,0214	0,00336
20/05/21	40,35	41,97	0,0311	0,00480
	44,31	68,29	0,0604	0,00950

Tabla 5 Valores de consumo de combustible en cada viaje Monzalbarba-Zaragoza. Fuente: Propia

DÍA	VELOCIDAD MEDIA REAL VIENTO FRONTAL (KM/H)	VELOCIDAD MEDIA DEL COCHE (KM/H)	LITROS DE GASOLINA	CONSUMO MEDIO DE GASOLINA (L/100KM)
15 /04/21	3,34	36,87	0,0161	0,00295
20/04/21	5,52	36,57	0,0210	0,00347
29 /04/21	4,47	35,53	0,0113	0,00187
6 /05/21	4,12	36,46	0,0142	0,00235
11/05/21	8,15	35,78	0,0187	0,00145

Gracias a estos resultados, se pueden observar algunos que llaman la atención que se detallan a continuación:

En primer lugar, el día 20/04/21 (en la tabla 5) con una velocidad media real del viento frontal y velocidad del vehículo muy similares a las obtenidas en el día 29/04/21 (en la tabla 6), se aprecia gran diferencia en el consumo de combustible, pasando de 0,0183 (L) en el primer día a 0,0113 (L) el segundo, es decir el día 29 se utilizó un 38,25% menos de combustible. Esto es debido a que la incidencia del viento era contraria en el primer día, es decir, considerando que la dirección norte abarca los ángulos de incidencia del viento entre 340° y 20° , el 68 % de los datos se corresponden con esta dirección en el primer día y tan solo el 12,38% de estos en el día 29, por lo que en este la dirección predominante era la sur, favorable a la del vehículo, como se puede ver en la siguiente gráfica.

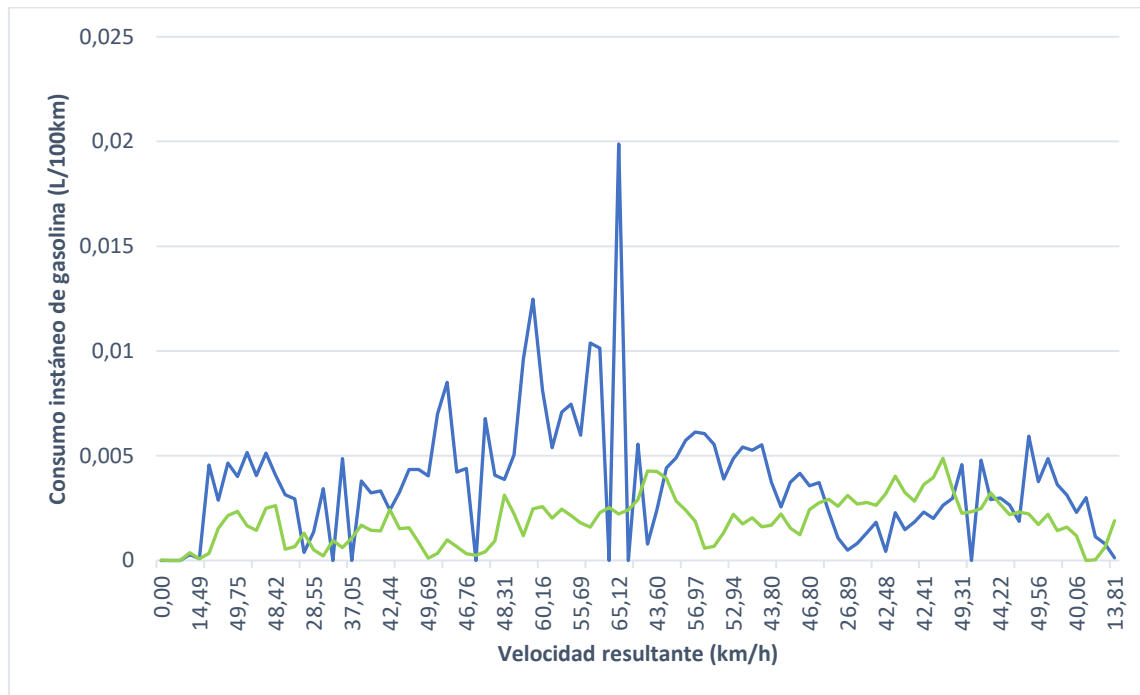


Gráfica 24 Valores de resistencia aerodinámica comprendidos entre los ángulos 340° y 20° . 20/04/21 (azul). 29/04/21 (verde). Fuente: Propia.

Por lo que el ángulo con el que incide el viento tiene influencia más que notable en el consumo de combustible, y en consecuencia en el gasto económico que conlleva. Concluyendo, que si es conocido al realizar un trayecto que el viento vendrá opuesto a el movimiento del coche, es mejor llevar velocidades bajas, para que el consumo de combustible no aumente, y por el contrario, si la

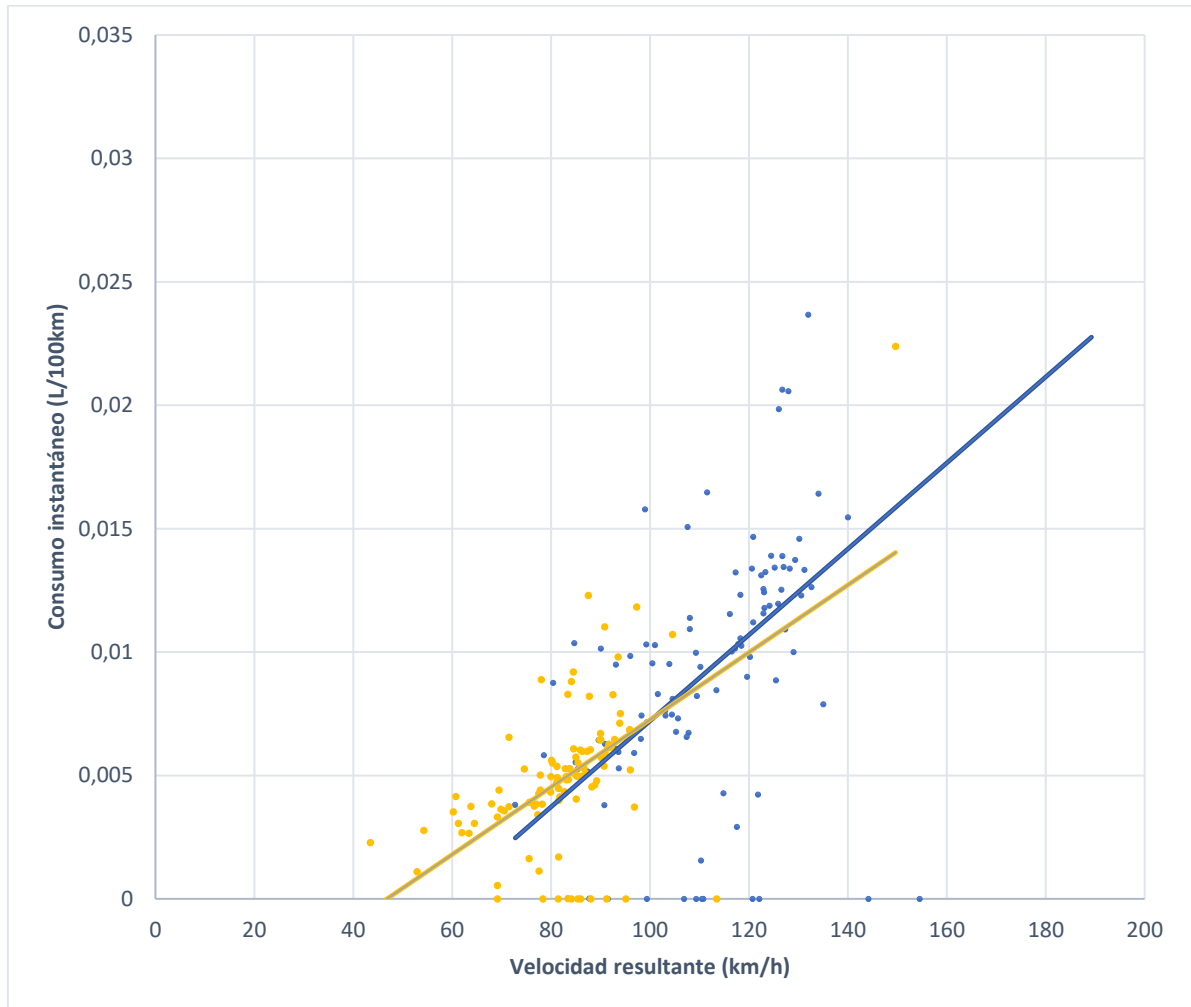
dirección va a ser en el sentido de avance del vehículo, se podrá alcanzar velocidades superiores sin gastos de combustible muy altos.

Esto queda representado en la gráfica 25 donde se representa el consumo de combustible en L/100km en los dos trayectos, respecto a la velocidad resultante, que como se ha explicado con anterioridad, es la suma de la velocidad del vehículo y del viento real frontal. Es posible representar estas dos líneas en un mismo gráfico ya que los valores de velocidad resultante en los dos trayectos son muy similares.



Gráfica 25 Consumo de gasolina instantáneo respecto a la velocidad resultante Día 20/04/21 (azul) Día 29/04/21 (verde). Fuente: Propia.

En segundo lugar, se encuentran otros dos valores muy significativos en la tabla 5 correspondientes con el día 20/05/21, en el que la velocidad del viento era muy alta. Como se observa reduciendo la velocidad del vehículo en 30 km/h se consigue un ahorro de combustible de aproximadamente un 50% desde 0,06045 a 0,03115 litros de gasolina. Esta diferencia queda representada en la gráfica 26.



Gráfica 26 Consumo de gasolina instantáneo debido a la resistencia aerodinámica respecto a la velocidad resultante. Día 20/05/21 a 70 km/h (azul) Día 20/05/21 a 40 km/h (naranja). Fuente: Propia.

Analizando con mayor detalle los distintos resultados obtenidos con los datos registrados, aproximando que la velocidad del vehículo se mantenía constante en los dos viajes, se obtiene:

Tabla 6 Consumo de gasolina (L/100km) en función de la velocidad del viento a una velocidad del vehículo determinada y el ahorro en el consumo en %. Fuente: Propia.

VELOCIDAD VEHÍCULO (KM/H)	VELOCIDAD REAL VIENTO FRONTAL (KM/H)	CONSUMO GASOLINA (L/100KM)	AHORRO CONSUMO DE GASOLINA
40	0	0,0010	82,45 %
70	0	0,0057	
40	10	0,0021	75,86 %
70	10	0,0087	
40	20	0,0026	72,91 %
70	20	0,0096	
40	30	0,0038	63,10 %
70	30	0,0103	
40	40	0,0052	62,31 %
70	40	0,0138	

Por lo que comparando estos resultados, en el caso favorable, en el que la velocidad del viento real frontal sea de 10 km/h, reduciendo la velocidad un 42,85 %, se consigue una reducción en el consumo de combustible del 75,86 %, y en el caso más desfavorable, en el que la velocidad del viento real frontal sea de 40 km/h, este porcentaje se sitúa en 62,31%. Concluyendo, que la reducción de la velocidad cuando la resistencia aerodinámica que se opone al movimiento del vehículo sea alta debido a que la velocidad del viento lo es, conlleva una reducción muy importante en el consumo de combustible, y en consecuencia en el ahorro económico y la emisión de contaminantes.

Desde un punto de vista realista, reducir la velocidad del vehículo en un 42% no suele ser posible, ya que no se circula a velocidades tan bajas en carretera. Sin embargo utilizando las relaciones proporcionales entre estos porcentajes, si la velocidad del vehículo disminuye en un 20%, por ejemplo se

pasa de circular a 120 km/h a 96 km/h, la reducción en el consumo de combustible en la situación más desfavorable (viento frontal de 40 km/h), se situará en un 29,08%.

Llevando estos resultados a un trayecto entre Zaragoza y Barcelona, de unos 310 km, en el que un vehículo circule a una velocidad aproximadamente constante de 120 km/h y la velocidad del viento sea alta, de 40 km/h, reduciendo la velocidad a 100 km/h, es decir un 17% menor, el ahorro en el combustible se sitúa en un 24,72%. Por lo que para las compañías de transporte que realizan trayectos continuamente entre dos localidades, resultaría muy útil el conocimiento de la velocidad real frontal del viento en cada instante, para, estableciendo un límite en la velocidad del vehículo, conseguir un ahorro considerable en el consumo de combustible, y en consecuencia, un ahorro económico.

7. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se ha demostrado la influencia de cada uno de los factores en las resistencias al avance del vehículo. Para ello se ha establecido la relación existente entre la aceleración del coche y la resistencia a las inercias, la pendiente y la resistencia a las pendientes, la velocidad del coche y la resistencia de rodadura y por último se ha puesto especial interés en la influencia de la velocidad del viento real, su ángulo de incidencia en el coche y la velocidad del vehículo en la resistencia aerodinámica.

Además de esto, se ha analizado la energía requerida por el motor para vencer cada una de las resistencias y con mayor hincapié la cantidad de combustible y el consumo de combustible instantáneo requerido para vencer la resistencia aerodinámica, ya que tener un control del consumo de combustible en la ruta es importante, tanto por factores económicos, como de contaminación.

En este trabajo, se ha comprobado que tanto la velocidad del viento real en la dirección de avance del vehículo como el ángulo con el que incide este en el vehículo tienen gran influencia en el consumo de combustible, siendo el segundo factor el más influyente, y el que añade más información de la que se tenía acerca de este tema.

Sin embargo, el viento se trata de un factor que no podemos controlar, es decir, no está en nuestras manos. Por esto, el factor que se puede modificar para ahorrar en el consumo de combustible es la velocidad del vehículo.

Así pues, se utilizan los resultados obtenidos en cada uno de los días para conseguir las líneas de tendencia del consumo instantáneo de combustible en L/100km, en función de la velocidad resultante, lo que permite establecer conclusiones a cerca del ahorro de combustible que se produce cuando la velocidad del coche se disminuye.

Estos, han demostrado que en un caso en el que el la velocidad del viento real frontal es de 10 km/h, reduciendo la velocidad en torno a un 40% se puede conseguir hasta un 75 % de ahorro de combustible, pudiendo llegar a un 62 % cuando la velocidad del viento real frontal supere los 40 km/h. Concluyendo, que

la reducción de la velocidad cuando la resistencia aerodinámica que se opone al movimiento del vehículo sea alta debido a que la velocidad del viento lo es, conlleva una reducción muy importante en el consumo de combustible, y en consecuencia en el ahorro económico y la emisión de contaminantes.

De esta manera, queda demostrado el principal objetivo de este trabajo, que consistía en la búsqueda de la optimización del combustible en el transporte por carretera, en función del conocimiento de la velocidad y dirección del viento.

Este trabajo es el primer eslabón en un proyecto futuro a considerar, en el que se permita la utilización de las aplicaciones móviles (por ejemplo Anemotracker) en cada momento en el transporte de mercancías por carretera, conociendo así la velocidad y dirección del viento en cada instante del trayecto y pudiendo optimizar la velocidad del camión, furgoneta, vehículo... para conseguir ahorros económicos.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Observatorio de costes del transporte de mercancías.
<https://www.mitma.gob.es/transporte-terrestre/servicios-al-transportista/observatorios-del-transporte/observatorios-del-transporte-de-mercancias-por-carretera/observatorios-costes-transporte-mercancias>
- [2] Instituto Nacional de estadística. <https://www.ine.es/>
- [3] Centro español de logística. <https://cel-logistica.org/>
- [4] Joe Trambly, Richard Ziernick, Ben Railsback and Mark Kittel (2009)
<https://knottlab.com/wp-content/uploads/2017/11/Wind-Effects-On-Dynamic-Stability-of-Tractor-Trailers-in-Winter-Conditions-SAE.pdf>
- [5] Roberth Castillo (2014)
<http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/7364/1/13292.pdf>
- [6] Albert Yela Paradas (2019) <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/181156>
- [7] Camino de Monzalbarba, Zaragoza.
https://es.wikipedia.org/wiki/Camino_de_Monzalbarba
- [8] Marc Font Jaumandreu, “estudio de la relación del conjunto neumático llanta de un automóvil, con el consumo energético y la seguridad vial” Escola Superior d’Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa (2014).
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/24328/MEMORIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>